



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TOMI MÖNKKÖNEN
TASE-KONSEPTI PROSESSIHOYRYVERKON HALLINNASSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Vilkkö
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 5. marraskuuta
2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

MÖNKKÖNEN, TOMI: Tase-konsepti prosessihöyryverkon hallinnassa

Diplomityö, 67 sivua

Marraskuu 2014

Pääaine: Prosessiautomaatio

Tarkastaja: professori Matti Vilkkö

Avainsanat: Höyryverkko, tase-konsepti, mallipohjainen säätö

Teollisuuden prosessihöyryverkkojen hallinta on usein hyvin heikolla tasolla. Paperiteollisuuden kova kilpailutilanne ja tiukentuneet päästötavoitteet ovat lisänneet tarvetta tehokkaammalle höyryverkon hallinnalle. Tässä diplomityössä kehitettiin tasepohjaista höyryverkon hallintamenetelmää, joka perustuu osittain ÅF-Consult Oy:n Balance+ – säätökonseptiin. Aiemmin kyseistä konseptia on käytetty menestyksekkäästi kattilan pääsäädoissä sekä kattilan tuliteho-vesi-tasapainon, tuorehöyryn loppulämpötilan ja lieriön pinnankorkeuden hallinnassa.

Tasekonseptin lisäksi tässä työssä kehitettiin kaksi tasauskomponenttien painerajoihin perustuvaa perinteistä höyryverkon hallintamenetelmää, joista toisessa käytetään syöttöveisisäiliötä höyrykuorman tasaukseen. Yleensä prosessiteollisuudessa syöttöveisisäiliötä ei käytetä höyrykuorman tasauskomponenttina. Näitä kolmea menetelmää vertailemalla saatiin eriteltyä sekä syöttöveisisäiliön että tasekonseptin käytön hyödyt höyryverkon hallinnassa. Tuloksia vertailtiin simulaattorilla, joka toteutettiin osana tätä diplomityötä Matlabin Simulink –ympäristössä. Simulointitulosten perusteella syöttöveisisäiliön käytöllä saadaan kasvatettua höyryverkon häiriöiden sietokykyä ja pienennettyä tarvetta apulauhdutukselle ja ulospuhallukselle. Tehtyjen simulointien perusteella tasekonseptin merkittävimpiä etuja ovat tasauskomponenttien pehmeämmät ohjausliikkeet ja energiataloudellisesti optimoitu kuormantasaustarpeen jakaminen. Tasaiset ja rauhalliset ohjaukset pienentävät höyryverkkoon kohdistuvia häiriöitä sekä kattilaan kohdistuvia rasituksia. Energiataloudellisesti optimaalisella kuormantasaustarpeen jaolla saadaan puolestaan minimoitua apulauhdutuksen ja ulospuhalluksen osuudet kuorman tasauksessa. Yhdessä tasekonseptilla ja syöttöveisisäiliön tasauskäytöllä saadaan aikaan merkittäviä säästöjä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Technology

MÖNKKÖNEN, TOMI: Balance –concept in process steam network control

Master of Science Thesis, 67 pages

November 2014

Major: Process Automation

Examiner: Professor Matti Vilkkio

Keywords: Steam network, Balance –concept, Model based control

Industrial process steam networks are often poorly controlled. Intense competition in paper industry and tightened emission restrictions have increased the need for advanced steam network control solutions. In this thesis a steam network control solution that uses balance –concept was developed. Suitable properties from ÅF-Consult Oy's Balance+ –concept were used in the development of the solution. By now Balance+ –concept is successfully applied in boiler main controls and to control power-feedwater-balance, live pressure steam temperature and drum boiler level.

In addition to balance –concept, two traditional steam network control solutions that are based on pressure limits were developed in this thesis. The difference between those two solutions is that one uses a feedwater tank in the steam load balancing and the other does not. Usually the feedwater tank is not used in load balancing in the process industry. By comparing these three control solutions the benefits of the use of feedwater tank and balance –concept was examined separately. Results were compared using a simulator, which was developed as a part of this thesis. The simulator was made in Matlab Simulink –environment. Simulation results show that the use of feedwater tank in load balancing increases disturbance tolerance of the steam network and reduces the use of auxiliary condenser and blow-out. The results also show that major benefits of the balance –concept in steam network control are smoother control operations and energy economically optimized use of steam load balancing components. Smoother control operations reduce the disturbances that the network faces. Energy economically optimized use of steam balancing components minimizes the use of uneconomical auxiliary condenser and blow-out valve. By taking advantage of the balance –concept and feedwater tank in steam network control, considerable savings will be achieved compared to traditional solutions.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereella ÅF-Consult Oy:lle. Työn aihe oli minulle hyvin mieleinen ja sitä tehdessäni pääsin soveltamaan oppimaani kummastakin käymästäni syventävästä opintokokonaisuudesta prosessiautomaatiosta ja voimalaitostekniikasta. Työ on tehty Tampereen teknillisen yliopiston systeemitekniikan laitokselle.

Ensimmäisenä haluan kiittää Jari Leppäkoskea, joka tarjosi minulle mahdollisuuden tämän diplomityön tekemiseen. Suuret kiitokset kuuluvat myös Jari Viitaselle, jolta olen saanut paljon tärkeää tietoa ja opastusta työn suorittamiseksi. Lisäksi haluan kiittää koko ÅF-Consult Oy:n Tampereen henkilökuntaa. He ovat aina tarpeen tullen auttaneet minua projektissani ja perehdyttäneet heidän säätöratkaisuihinsa. Koululta haluan kiittää työni ohjaajaa professori Matti Vilkkoa, joka on ohjannut työtä oikeille urilleen. Haluan kiittää myös työni toista ohjaajaa Yrjö Majannetta, jolta sain hyviä neuvoja etenkin työssä tehdyn simulaattorin toteutuksen suhteen. Kiitokset kuuluvat myös opiskelukave-reilleni, joiden kanssa on yhdessä selvitty myös vaikeimmista hetkistä opintojen varrel-la. Loppuun kiitän vielä perhettäni, joka on kannustanut minua pienestä saakka kohti unelmaani valmistua jonain päivänä diplomi-insinööriksi.

Tampereella 8.11.2014

Tomi Mönkkönen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	II
ABSTRACT.....	III
ALKUSANAT.....	IV
TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT	VII
1 JOHDANTO.....	1
1.1 Höyryverkkojen hallinnan haasteet.....	1
1.2 Kehitettyjä ratkaisuja höyryverkkojen hallintaan	2
1.3 Tämän työn tarkoitus.....	3
1.4 Työn sisältö	3
2 HÖYRYVERKOT JA NIIDEN MALLINNUS.....	4
2.1 Höyrykattila.....	4
2.2 Höyrytukki	5
2.3 Turbiini.....	6
2.4 Syöttövesisäiliö	7
2.5 Höyryakku.....	8
2.6 Apulauhdutin.....	9
2.7 Reduktio-, ulospuhallus- ja varoventtiilit.....	9
3 SÄÄTÖTEORIAA.....	11
3.1 PID-säädin.....	11
3.2 Integraattorin anti-windup.....	12
3.3 Myötäkytkentä.....	14
3.4 Kaskadisäätö	15
3.5 Balance+.....	15
4 ESIMERKKILAITOS JA SIMULINK-MALLI.....	17
4.1 Höyryverkon rakenne ja toiminta.....	17
4.2 Prosessin komponenttien mitoittaminen	19
4.2.1 Venttiileiden ja turbiinin mallintaminen.....	19
4.2.2 Kattilan ja höyrytukkien mallintaminen	20
4.3 Simulink -toteutus	22
4.3.1 X Steam.....	22
4.3.2 Simulink -lohkot ja niiden käyttötarkoitukset	22
5 SÄÄDÖN TOTEUTUS	26
5.1 Höyryverkon hallinnan periaatteet	27
5.2 Perussäätöpiirit	28
5.2.1 KP-paineen ja höyryntuotannon säätö	28
5.2.2 VP-paineen säätö	29
5.2.3 MP-paineen säätö.....	30
5.2.4 Reduktioventtiileiden säädöt.....	31
5.2.5 Höyryakun paineen ja pinnankorkeuden hallinta	32
5.2.6 Syöttövesisäiliön pinnankorkeuden ja paineen säätö.....	33

5.2.7	Apulauhdutin ja sähkötehon maksimointi sekä ulospuhallus	33
5.3	Painerajoihin perustuva perinteinen ratkaisu	35
5.4	Tasepohjainen ratkaisu	37
5.4.1	Syöttövesisäiliön ohjaus	39
5.4.2	Höyryakun ohjaus	40
5.4.3	Apulauhdutin ja ulospuhallusventtiili	40
5.5	Painerajoihin perustuva ratkaisu syöttövesisäiliön kanssa.....	41
6	TULOKSET	43
6.1	Pysyvä ratakatko	43
6.1.1	Verkon paineet ja niiden ohjaukset ratakatkossa	43
6.1.2	Tasauskomponenttien käyttö ratakatkossa.....	47
6.1.3	Yhteenveto ratakatkosta.....	50
6.2	10 minuutin ratakatko	51
6.2.1	Verkon paineet ja niiden ohjaukset väliaikaisessa katkossa.....	51
6.2.2	Tasauskomponenttien käyttö väliaikaisessa katkossa.....	54
6.2.3	Yhteenveto väliaikaisesta katkosta	56
6.3	Polttoaineen lämpöarvon heikkeneminen	57
6.3.1	Verkon paineet ja niiden ohjaukset lämpöarvon heikentyessä	57
6.3.2	Tasauskomponentit lämpöarvon heikentyessä.....	60
6.3.3	Yhteenveto lämpöarvon heikentymisestä	61
6.4	Tase-konseptin toimivuus ja käytännön huomioita.....	62
7	YHTEENVETO	63
	LÄHTEET	65

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Lyhenteet

KP	Korkeapaine
MP	Matalapaine
VP	Välipaine

Symbolit

A	Pinta-ala [m^2]
d	Halkaisija [m]
h	Ominaisentalpia [J/kg]
\dot{m}	Massavirta [kg/s]
K	Venttiilivakio
m	Massa [kg]
p	Paine [Pa]
P	Teho [W]
Q	Lämpöenergia [J]
s	Laplace –muuttuja
t	Aika [s]
t_d	Viive [s]
v	Nopeus [m/s]
V	Tilavuus [m^3]
x	Venttiilin asento
η_k	Kattilan hyötysuhde
η_s	Turbiinin isentrooppihyötysuhde
τ	Aikavakio
ρ	Tiheys [kg/m^3]

1 JOHDANTO

Höyryverkon tehtävä on välittää luotettavasti prosessihöyryä sitä tarvitseville kuluttajille sopivassa paineessa ja lämpötilassa. Höyryn tuottaa höyrykattila ja sitä käytetään teollisuusprosesseissa esimerkiksi lämmittämiseen, kuivaamiseen ja höyrystämiseen. Prosessit tarvitsevat höyryä monissa painetasoissa, joten höyryverkkojen on koostuttava useista eri paineisista höyrylinjoista. Höyryverkkojen hallinnalla on keskeinen rooli etenkin paperiteollisuudessa äkillisistä häiriöistä ja nopeista kuormanmuutoksista johtuen. Höyryverkon hallinnassa myös sähköntuotannon optimointi sähkönhinnan mukaan on noussut viimeaikoina yhä tärkeämmäksi paperiteollisuuden tiukasta kilpailutilanteesta johtuen. Paperiteollisuuden lisäksi höyryverkkoja esiintyy kemianteollisuudessa, terästeollisuudessa ja öljynjalostuksessa. Höyryverkoille kehiteltyjä hallintamenetelmiä voidaan käyttää myös kaasun kulutusverkkojen säädössä. Tässä diplomityössä höyryverkkojen hallintaan liittyviä ratkaisuja käsitellään lähinnä paperitehtaiden kannalta.

Höyryverkko koostuu useista eri komponenteista. Höyryverkon tehtävä on kuljettaa höyryä tuottajilta kuluttajille. Paineen alentaminen tehdään yleensä turbiinilla, mutta tarpeen tullen se voidaan tehdä myös reduktioventtiileitä käyttämällä, jolloin ohitetaan turbiini ja menetetään sähkötehoa. Ylimääräistä höyryä voidaan varastoida höyryakkuun. Akkua voidaan vastaavasti purkaa höyryntarpeen kasvaessa. Myös syöttövesisäiliöön voidaan syöttää ylimääräistä höyryä kuorman tasaamiseksi. Mikäli höyryä muodostuu liikaa ja höyrynpaine kasvaa, voidaan höyryä lauhduttaa apulauhduksella tai puhaltaa ulos verkosta ulospuhallusventtiilillä. Näitä komponentteja käytettäessä höyryn lämpöenergia jää kuitenkin hyödyntämättä. Ulospuhallusta käytettäessä menetetään myös lauhde. Höyryverkoissa komponenttien välillä on runsaasti ristikkäisvaikutuksia. Tämä yhdessä edellä lueteltujen ohjausmahdollisuuksien kanssa tekee höyryverkkojen hallinnasta vaikeasti hallittavan kokonaisuuden.

1.1 Höyryverkkojen hallinnan haasteet

Höyryverkon säätöjä parantamalla voidaan parantaa prosessin kokonaishyötysuhdetta ja saada suuria säästöjä vähentyneen polttoaineen ja lisäveden muodossa. Vielä tärkeämpänä voidaan pitää välillisiä säästöjä, jotka koostuvat komponentteihin kohdistuvien rasiusten vähentymisestä, toimilaitteiden huoltovälin pitenemisestä ja toimintavarmuuden paranemisesta. Pohjimmainen ongelma paperitehtaiden höyryverkkojen säädössä on käytetystä polttoaineesta johtuva leijukattilan hitaus. Häiriöt voivat puolestaan olla hyvin nopeita ja ne voivat aiheuttaa lähes askelmaisia muutoksia höyryn kulutukseen. Lähtökohtana höyryverkon säädössä voidaan kuitenkin pitää sitä, että kattilan säädöt on viritetty hyvin. Tämä luo pohjan höyryverkon tasaiselle toiminnalle.

Perinteisten yksikkösäätimien paineensäädön ongelmia ovat säätimien toiminnan riippuvuus prosessin toimintapisteestä ja säätimen ylioheutus pitkistä vasteajoista johtuen. Prosesseilla on lisäksi ristikkäisvaikutuksia ja eri säätimet saattavat pahimmillaan taistella toisiaan vastaan. Nämä tekijät aiheuttavat värähtelyä etenkin kuormanmuutostilanteissa, mutta myös tasaisilla kuormilla. Höyrynpaineen vaihtelu puolestaan aiheuttaa ongelmia höyryä käyttävälle prosessille ja pahimmillaan suuret heilahtelut voivat johtaa prosessin alasajoon. Jotta höyrynpaine saadaan pysymään halutulla alueella, joudutaan häiriötilanteissa usein tasaamaan höyrynpainetta epäedullisesti esimerkiksi poistamalla ylimääräinen höyry verkosta ulospuhallusventtiileillä tai lauhduttamalla se apulauhduttimella. Perinteisillä säätöratkaisuilla tähän joudutaan kuitenkin turhan usein, koska säätimet eivät osaa ennakoita häiriöiden tulevia vaikutuksia höyryverkon paineeseen. Ne eivät myöskään osaa varautua muiden säätimien aiheuttamiin ristikkäisvaikutuksiin ennen kuin niiden vaikutus näkyy säätimien mittauksissa. Näiden ongelmien vuoksi hyvien säätötulosten saavuttamiseksi tarvitaan moderneja ja kehittyneitä säätöratkaisuja, joiden avulla voidaan saavuttaa merkittäviä etuja perinteisiin ratkaisuihin verrattuna.

1.2 Kehitettyjä ratkaisuja höyryverkkojen hallintaan

Maailmalla höyryverkkojen säätöratkaisuja tarjoavat useat yritykset. Höyryverkkojen säätöprojektit ovat yleensä kertaluonteisia hankkeita, eikä niitä ole tuotteistettu. On olemassa kuitenkin kaksi kotimaista tuotteistettua höyryverkon hallintaratkaisua. Nämä ovat Metson Steam Manager ja Pöyryn Steam Balance. Suomessa näiden lisäksi ÅF-Consult Oy tekee höyryverkkojen säätöjä ja heidän ratkaisuaan ollaan tuotteistamassa osana tätä diplomityötä.

Perinteisten säätötapojen heikkouksien takia Metso on kehittänyt höyryverkkojen hallintaan mallipredikttiivisen säätömenetelmän, joka pystyy huomioimaan prosessin pitkät viiveet, ohjausrajoitukset ja ristikkäisvaikutukset. Tällä tuotenimeä Steam Manager kantavalla ratkaisulla on höyrynpaineet saatu pysymään paremmin halutuissa arvoissaan, onnistuttu vähentämään energiaa tuhlaavien komponenttien käyttöä ja minimoimaan operointitarvetta [1]. Koska tässä työssä ei tulla hyödyntämään mallipredikttiivistä säätöä, ei aiheeseen perehdytä tämän tarkemmin. Majanne on käsitellyt mallipredikttiivistä säätöä kattavasti AEL Insko-seminaarissa [2] ja sen soveltamista höyryverkoille julkaisussaan Model Predictive Pressure Control of Steam Networks [3].

Vaikka höyryakkuja on runsaasti käytössä nykyään, jää niiden täysi potentiaali usein hyödyntämättä. Tämä johtuu siitä, että niitä käytetään tyypillisesti vain äärimmäisessä tarpeessa. [4, s. 2.] Pöyryn kehittämä Steam Balance perustuu höyryakun aktiiviseen säätöön yhdistettynä kehittyneeseen höyryverkon hallintaan. Aktiivisessa akun säädössä akkua ladataan, kun höyryä tuotetaan enemmän kuin sitä käytetään ja päinvastoin. Tällä tavalla ennaltaehkäistään verkon paineen vaihtelut ja samalla pienennetään tehohäviöitä esimerkiksi lauhduttimeen tai ulospuhallukseen menevän höyryn muodossa. Steam Balancella on saatu aikaan merkittäviä säästöjä. Lisätietoja Steam Balancesta löytyy Pöyryn esitteestä [4].

1.3 Tämän työn tarkoitus

Metson ratkaisu on integroitu MetsoDNA-järjestelmään, eikä sitä näin ollen voida käyttää muissa automaatiojärjestelmissä. Sama ongelma pätee malliprediktiivisellä säädöllä muutenkin. ÅF-Consult Oy ei halua sitoutua mihinkään tiettyyn automaatiojärjestelmään, vaan tuotteen on oltava järjestelmästä riippumaton. Tällöin se pystytään toteuttamaan millä tahansa automaatiojärjestelmällä. Tästä johtuen tässä työssä höyryverkon hallintaa ei toteuteta malliprediktiivistä säätöä käyttäen. Pöyryn ratkaisu perustuu yksikkösäätimiin, eikä siinä ole Metson Steam Managerin kaltaista tietyn automaatiojärjestelmän käyttöön liittyvää rajoitusta. Yksikkösäätimillä ei koskaan voida huomioida muiden säädinten aiheuttamia ristikkäisvaikutuksia ennen kuin ne näkyvät säätimen mittauksessa. Täten myös viiveiden ja ohjausrajoitusten huomioiminen samoin kuten malliprediktiivessä säädössä on yksikkösäätimillä mahdotonta.

Tässä työssä kehitetään höyryverkoille säätöratkaisu, joka koostuu kaikista automaatiojärjestelmistä löytyvistä peruslohkoista. Tällöin ratkaisu on toteutettavissa kaikilla automaatiojärjestelmillä. Ratkaisusta pyritään tekemään kilpailukykyinen mallipohjaiseen säätöön perustuvien ratkaisujen kanssa ja parempi kuin pelkillä yksikkösäätimillä toteutetuista ratkaisuista. Tähän tulokseen pyritään soveltamalla ÅF Consult Oy:n kehittämää Balance+ –säätökonseptia, joka on kehitetty kattilasäätöjä varten. Menetelmä pohjautuu itseoppivaan malliin, myötäkytkentään ja taseyhtälöihin. Näistä ominaisuuksista itseoppivuutta eli adaptiivisuutta ei tulla soveltamaan höyryverkoille. Höyryverkkojen hallinnassa keskitytään nopeisiin häiriöihin, joiden korjaamisessa mallin adaptiivisuus toimii hitaasti ja sen käyttö on täten turhaa. Balance+ ja sillä saatuja säätöjä on esitelty ÅF-Consultin esitteessä [5]. Balance+ –konseptin toimintaan palataan tarkemmin luvussa 3. Säätösuunnittelua varten työssä tehdään prosessista simulaattori Matlabin Simulink -ohjelmalla. Varsinaisen kehitettyä säätöratkaisun lisäksi työssä suunnitellaan myös kaksi erilaista yksikkösäätimiin perustuvaa säätöratkaisua tulosten vertailua varten. Työn tuloksista havaitaan kehitettyä tasepohjaisen säätöratkaisun toimivan perinteisiä ratkaisuja paremmin höyryverkkojen hallinnassa.

1.4 Työn sisältö

Työn luvussa 2 käydään läpi höyryverkkoon kuuluvat komponentit, niiden tehtävät sekä niiden mallintamiseen käytetyt yhtälöt. Luvussa 3 esitellään työssä hyödynnetyt säätöteoriat sekä Balance+ –säätökonsepti. Luvussa 4 esitellään esimerkkilaitos, jolle höyryverkkosimulaattori tehdään ja käydään läpi asioita simulaattorin toteutuksesta. Luvussa 5 kehitetään höyryverkon säätöratkaisut työssä simuloitaville höyryverkon hallintamenetelmille. Luvussa 6 esitellään simulointituloksia ja vertaillaan eri ratkaisujen toimivuutta. Lopuksi yhteenvedossa tiivistetään työn keskeisimmät tulokset ja jatkokehitysmahdollisuudet.

2 HÖYRYVERKOT JA NIIDEN MALLINNUS

Tässä luvussa esitellään höyryverkon komponentit ja niiden tehtävät. Lisäksi käydään läpi yhtälöt, joiden avulla kukin komponentti voidaan mallintaa. Suurin osa yhtälöistä on peräisin kirjasta Voimalaitosautomaatio [6]. Mallinnus tehdään siten, että malli kuvaa realistisesti komponenttien toimintaa höyryverkon hallinnan kannalta. Malleista ei kuitenkaan tehdä liian yksityiskohtaisia ja ilmiöt, jotka eivät ole tärkeitä verkon hallinnassa jätetään mallintamatta. Tällöin työssä tehtävästä simulaattorista ei tule kohtuuttoman raskas.

Voimalaitosten ja höyryverkkojen yksityiskohtaisempaa mallintamista esitellään kirjassa Computer Simulation of Thermal Plant Operations [7]. Yksityiskohtainen selostus kunkin voimalaitoskomponentin rakenteesta ja toiminnasta rajataan työn ulkopuolelle ja komponentit ja niiden toiminnot esitellään pääpiirteittäin. Tarkempaa tietoa voimalaitosten rakenteesta ja komponenteista löytyy esimerkiksi kirjasta Höyrykattilatekniikka [8].

2.1 Höyrykattila

Höyrykattilan tehtävä on tuottaa korkeapaineista höyryä, jota kutsutaan yleisesti tuorehöyryksi. Höyrykattiloissa poltetaan polttoainetta, jolloin siihen sitoutunut kemiallinen energia vapautuu lämmöksi. Reaktiossa vapautunut lämpö siirretään kattilan seinissä sijaitsevien höyrystinputkien läpi veteen, joka höyrystyy. Höyrystimen jälkeen höyry kulkeutuu tulistimeen, jossa lämpöä siirtyy höyryyn sekä tulipesästä säteilemällä että savukaasuista konvektiolla, jolloin höyryn lämpötila nousee.

Paperitehtaassa on tyypillisesti vakiokuormalla toimiva soodakattila ja sen rinnalla toimiva säätökattila. Teollisuuden höyrykattilat ovat alikriittisiä luonnonkiertokattiloita, jotka soveltuvat hyvin vastapaineturbiinin kanssa käytettäväksi [9, s. 99]. Metsäteollisuudessa suositaan säätökattilana kattilatyyppejä, joissa on mahdollista polttaa vaihtelevaa polttoainetta. Tästä ainakin osa on puunjalostusprosessin sivutuotteita, kuten kuorimolta peräisin olevaa puun kuorta. Tyypillisesti tämä polttoaine on hyvin kosteaa, jolloin kattilalta vaaditaan kykyä polttaa hyvällä hyötysuhteella kosteaakin polttoainetta. Tämän vuoksi metsäteollisuuden kattilat usein hyödyntävät leijukerrostekniikkaa. Se tarkoittaa polttotekniikkaa, jossa polttoaine palaa inertin materiaalin, yleensä hiekan, sisällä tai välittömässä läheisyydessä. Tyypillisesti noin 850 asteinen hiekkakerros toimii hyvänä lämpövarastona, joka kuivattaa kosteankin polttoaineen tehokkaasti ja siksi sallii suuria kosteusvaihteluita polttoaineessa [10, s. 29].

Yksityiskohtaisen kattilamallin laatiminen on varsin monimutkainen tehtävä. Höyryverkkojen hallinnan kannalta kattilamallista voi tehdä kuitenkin hyvin yksinkertaisen,

koska ollaan kiinnostuneita vain polttoaineen massavirran ja polttoainetehon sekä polttoainetehon ja tuotetun höyrytehon välisistä yhteyksistä. Polttoaineteho lasketaan seuraavasti

$$P_{pa} = \dot{m}_{pa} Q_{pa}, \quad (1)$$

jossa \dot{m}_{pa} on polttoaineen massavirta ja Q_{pa} polttoaineen tehollinen lämpöarvo. Polttoainetehon ja höyrytehon välinen yhteys voidaan mallintaa ensimmäisen kertaluvun viiveellisenä järjestelmänä, jonka siirtofunktio on

$$G(s) = \frac{\eta_k}{\tau s + 1} e^{-t_d s}, \quad (2)$$

jossa η_k on kattilakyötysuhde, joka kuvaa polttoainetehosta höyrytehoksi saatavaa osaa, τ on kattilan aikavakio, t_d kattilan viive ja s Laplace- muuttuja. Laplace- muunnosta ja siirtofunktio teoriaa on käsitelty prosessiteknisestä näkökulmasta esimerkiksi teoksessa Advanced Modern Engineering Mathematics [11].

Todellisuudessa syntyvän höyryvirran laskeminen ei ole näin suoraviivaista, koska vaihtelut paineessa muuttavat kiehumispistettä ja lieriöön varastoitunutta energiasisältöä. Olettamalla tuorehöyryn paineen pysyvän kutakuinkin vakiona voidaan höyryteho mallintaa melko hyvällä tarkkuudella yhtälön 2 mukaisesti. Tarkemmassa kattilamallissa myös lieriö on mallinnettava. Esimerkki yksityiskohtaisesta lieriömallista löytyy K.J. Åströmin ja R.D. Bellin julkaisusta Drum-Boiler Dynamics [12].

2.2 Höyrytukki

Höyrytukkit ovat höyryputkia, joissa höyry kulkeutuu voimalaitokselta sitä tarvitseville kuluttajille. Höyrytukkeja on useissa eri painetasoissa. Eri paineisista tukeista käytetään yleensä nimiä korkeapaine-, välipaine- ja matalapainetukki. Näistä eri painetasoista käytetään usein lyhenteitä KP, VP ja MP. Höyryverkkojen hallinnassa keskeisin osa on näiden paineiden stabilointi.

Höyrytukki mallinnetaan massa- ja energiataseilla. Massatase on

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2, \quad (3)$$

jossa m on tukkiin varastoitunut massa sekä \dot{m}_1 ja \dot{m}_2 ovat tukkiin tulevien ja sieltä poistuvien massavirtojen summat. Nämä virtaukset ovat yhteydessä esimerkiksi turbiniin, reduktioventtiileihin ja höyryakkuun. Energiatase höyrytukille on puolestaan

$$\frac{dQ_h}{dt} = h_1 \dot{m}_1 - h_h \dot{m}_2 - p_h \frac{\dot{m}_1 - \dot{m}_2}{\rho_h}, \quad (4)$$

jossa Q_h on tukkiin varastoitunut energia, h_1 ja h_h tukkiin tulevan ja siellä olevan höyryn ominaisentalpiat, p_h tukin paine sekä ρ_h höyryn tiheys tukissa.

Taseyhtälöistä saatavien tukin energiasisällön ja massan avulla saadaan höyryn ominaisentalpia seuraavasti

$$h_h = \frac{Q_h}{m_h}. \quad (5)$$

Höyryn tiheys saadaan varastoituneen massan ja tukin tilavuuden suhteesta

$$\rho_h = \frac{m_h}{V}. \quad (6)$$

Höyrytukin paine voidaan lukea höyrytaulukosta [9, liite 3] edellä määriteltyjen tiheyden ja ominaisentalpian avulla.

Höyrytutit mitoitetaan yleensä siten, että prosessihöyryn nopeus tehtaille menevissä putkissa on välillä 20...30 m/s. Tätä suurempia nopeuksia ei haluta, koska nopeuden kasvaessa virtausvastukset ja täten myös painehäviöt kasvavat [7, s.101]. Höyryputkessa kulkeva massavirta saadaan seuraavasti

$$\dot{m} = vA\rho = \frac{v\pi d^2\rho}{4}, \quad (7)$$

jossa v on höyryn virtausnopeus, A putken poikkipinta-ala, ρ höyryn tiheys ja d putken sisäpuolinen halkaisija.

2.3 Turbiini

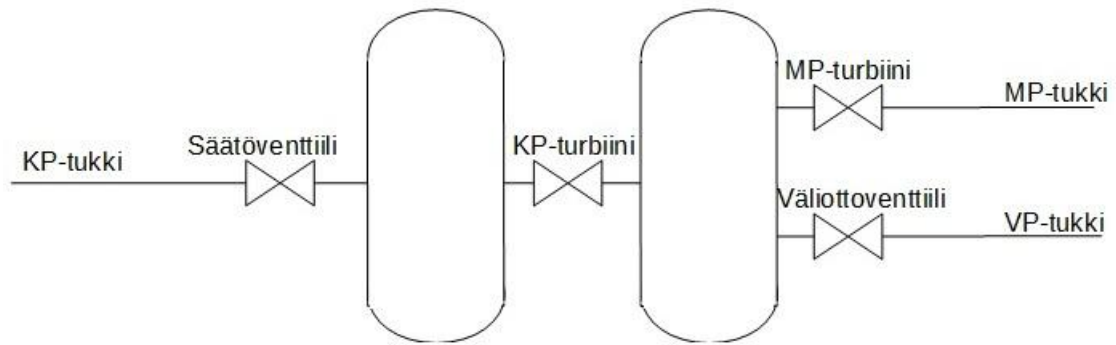
Höyryturbiinin tehtävänä on muuttaa virtaavan höyryn sisältämä lämpöenergia mekaaniseksi energiaksi, joka muutetaan generaattorin avulla sähköksi [13, s. 10 – 11]. Höyrykattilan jälkeinen korkeapainehöyry on yleensä liian korkeassa paineessa ja lämpötilassa käytettäväksi suoraan teollisuusprosesseissa. Paine alennetaan yleensä turbiinilla, jota kutsutaan vastapaineturbiiniksi prosessiteollisuudessa käytetyn suhteellisen suuren vastapaineen vuoksi. Korkeapaineista tuorehöyryä kannattaa kuitenkin tuottaa, koska sähköntuotannon sisäinen hyötysuhde on lähes 100 % höyryn paisuessa vastapaineeseen. Tällainen ratkaisu on siis kannattava, vaikka korkeampi tuorehöyryn paine tarkoittaa samalla korkeampia kattilan investointikustannuksia. [9, s. 28.]

Höyryverkkojen hallinnan kannalta turbiinimallista voi tehdä melko yksinkertaisen, koska virtausten sisäisestä käyttäytymisistä ei olla kiinnostuneita. Työssä käytetty turbiinimalli koostuu venttiileistä, jotka kuvaavat paisuntoja ja säiliöistä, jotka kuvaavat höyryputkien tilavuuksia. Lisäksi tarvitaan säätö- ja väliottoventtiilit. Periaatekuva turbiinimallin rakenteesta on esitetty kuvassa 1.

Turbiinin mallinnuksessa tarvitaan yhtälöt venttiileiden ja turbiinin läpi kulkeville massavirroille. Massavirta lasketaan seuraavasti

$$\dot{m} = xK\sqrt{(p_1 - p_2)\rho_1}, \quad (8)$$

jossa x on venttiilin ohjaus, K venttiilin virtausta kuvaava vakio, p_1 ja p_2 paineet ennen ja jälkeen venttiilin sekä ρ_1 höyryn tiheys ennen venttiiliä. Myös turbiinin paisuntoja kuvataan venttiiliyhtälöllä 8 ilman termiä x , koska paisuntoja ei säädetä.



Kuva 1: Periaatekuva turbiinimallin rakenteesta.

Venttiiliyhtälön lisäksi tarvitaan luvun 2.2 mukaiset höyrytukin mallinnuksessa tarvittavat yhtälöt venttiileiden välisille tilavuuksille sekä yhtälö ominaisentalpian muutoksille höyryn paisunnassa. Tavallisissa venttiileissä sen sijaan entalpia pysyy vakiona. Entalpia paisunnan tietyssä pisteessä lasketaan yhtälöstä

$$h_x = h_0 - \eta_s(h_0 - h_{xs}), \quad (9)$$

jossa h_0 on entalpia ennen turbiinia, η_s turbiinin isentrooppihyötysuhde ja h_{xs} lasketun pisteen entalpia mikäli paisunta tapahtuisi isentrooppisesti. h_{xs} voidaan määrittää höyrytaulukosta paisuntapaineen ja alkupisteen entropian kohdalta, koska isentrooppisessa paisunnassa entropia säilyy vakiona [9, s. 26].

Turbiinista saatava sähköteho saadaan puolestaan seuraavasti

$$P = \eta_g(\dot{m}_{KP}\Delta h_{KP} + \dot{m}_{MP}\Delta h_{MP}), \quad (10)$$

jossa η_g on generaattorin hyötysuhde, \dot{m}_{KP} ja \dot{m}_{MP} turbiinin korkeapaine- ja matalapaine osien läpi menevät massavirrat ja Δh_{KP} sekä Δh_{MP} näissä osissa tapahtuvat entalpiamuutokset.

Edellä esitetyillä yhtälöillä toteutettu turbiinimalli on hyvin yksinkertainen. Se kuitenkin ajaa asiansa simuloitaessa höyryverkkojen toimintaa. A. Chaibakhsg ja A. Ghafari ovat tutkineet turbiini-generaattorimallia, jolla saadaan mallinnettua turbiinin transienttivasteita hyvin tarkasti julkaisussa Steam Turbine Model [14].

2.4 Syöttövesisäiliö

Syöttövesisäiliön pääasiallinen tarkoitus on toimia puskurisäiliönä syöttövesivirtauksen ja säiliöön tulevan lauhdevirtauksen määrien vaihdellessa. Lisäksi syöttövesisäiliössä poistetaan liuenneet kaasut vedestä höyryvirtauksen avulla. Samalla se toimii esilämmittimenä, joka parantaa voimalaitosprosessin hyötysuhdetta. [9 s. 52.]

Syöttövesisäiliö on tilavuudeltaan melko suuri ja soveltuu täten myös höyrynpaineen tasaamiseen. Syöttövesisäiliön höyryvirtausta voidaan väliaikaisesti nostaa kasvattamalla säiliöön menevää lisävesivirtausta. Vastaavasti höyryn puutteessa sinne virtaa höyryvirtausta voidaan vähentää lisävesivirtausta pienentämällä. Lisävesivirtauksen kasvattaminen laskee säiliön lämpötilaa ja painetta, johon painesäädin reagoi kasvatta-

mallalla säiliöön otettavaa höyryvirtausta. Energian purkaminen syöttövesisäiliöstä on kuitenkin hidasta ja tapahtuu kattilan syöttöveden tarpeen ehdoilla. Höyryvirtausta kuristettaessa on myös pidettävä huoli siitä, ettei syöttöveden kaasunpoisto häiriinny. Syöttövesisäiliö on kuormantasauskomponenteista kaikista taloudellisin, sillä sen käyttö ei aiheuta ylimääräisiä tuotannonmenetyksiä. Tästä huolimatta sen käyttö kuormantasaukseen on teollisuudessa harvinaista.

Syöttövesisäiliöön pumpataan lauhdetta ja lisävetä. Lisäksi sinne virtaa väliotto- tai matalapainehöyryä höyryventtiilin läpi. Virtaus venttiilin läpi mallinnetaan luvun 2.3 mukaisella venttiiliyhtälöllä 8. Mallinnuksessa oletetaan, että ainoa säiliöstä poistuva virtaus on syöttövesivirtaus kattilaan. Täten syöttövesisäiliön massataseeksi saadaan

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{lauhde} + \dot{m}_{lisävesi} + \dot{m}_{höyry} - \dot{m}_{syöttövesi}. \quad (11)$$

Energiatase on puolestaan seuraava

$$\frac{dQ}{dt} = (h\dot{m})_{lauhde} + (h\dot{m})_{lisävesi} + (h\dot{m})_{höyry} - (h\dot{m})_{syöttövesi}. \quad (12)$$

Mallinnuksessa oletetaan kaiken höyryn lauhtuvan säiliössä välittömästi sekä syöttöveden olevan kylläisessä tilassa. Tällöin säiliön paine voidaan määrittää kylläisen veden taulukosta käyttämällä energiataseen ja yhtälön 5 avulla saatua veden ominaisentalpiaa.

2.5 Höyryakku

Höyryakku on puhtaasti höyryverkon paineen tasaukseen ja väliaikaiseen höyryn tuottamiseen tarkoitettu komponentti. Se on säiliö, joka sisältää kylläistä vettä ja höyryä. Normaalisti veden pinnankorkeus on noin puolillaan. Yleensä höyryakku kytketään väli- ja matalapaineverkkojen väliin. Ylärajan akun paineelle asettaa välipainehöyryn paine ja alarajan matalapainehöyryn paine. Akkujen ei kuitenkaan yleensä anneta täyttyä välipaineverkon tasolle, koska kyseinen painetaso voi olla liian korkea akulle.

Höyryakkua ladattaessa välipainelinjasta sen paine kasvaa. Samalla veden höyrystymislämpötila kasvaa, höyryä lauhtuu ja akun pinta nousee. Kuristuksen vuoksi akun paine on aina purkauspainetta suurempi, joten höyryakkua purettaessa saadaan tulistettua höyryä. Tämä perustuu siihen, että alle 30 bar paineissa paineen laskiessa kylläisen höyryn entalpia pienenee, mutta kuristuksessa entalpia ei muutu. Tällöin kuristus tuottaa tulistettua höyryä. [9, liite 3.]

Höyryakun mallinnuksessa oletetaan, että akkuun ladattava höyry lauhtuu välittömästi vedeksi. Lisäksi oletetaan kaiken akussa olevan veden olevan kylläisessä tilassa. Höyryakun massatase on

$$\frac{dm_a}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2. \quad (13)$$

jossa m_a on akkuun varastoitunut vesi, \dot{m}_1 akkuun tulevan höyryn massavirta ja \dot{m}_2 poistuvan höyryn massavirta. Massavirrat voidaan laskea venttiiliyhtälön 8 avulla. Energiatase höyryakulle on puolestaan

$$\frac{dQ_a}{dt} = h_1 \dot{m}_1 - h_2 \dot{m}_2, \quad (14)$$

jossa Q_a on akkuun varastoitunut energia, h_1 akkuun virtaavan höyryn ominaisentalpia ja h_2 akusta poistuvan höyryn ominaisentalpia.

Höyryakun paine määritetään samalla tavalla hyödyntäen ominaisentalpiaa ja kylläisen veden taulukkoa kuin syöttövesisäiliön tapauksessa. Koska mallinnuksessa oletetaan kaiken energian olevan vedessä, on veden laskettu entalpia ja paine hieman todellista suuremmat.

2.6 Apulauhdutin

Apulauhdutinta käytetään, kun höyryn kulutus ei riitä kattamaan tuotetun höyryn määrää. Ohjaamalla ylimääräinen höyry apulauhduttimeen saadaan estettyä höyryverkon paineiden nousu. Apulauhduttimessa höyry lauhdutetaan jäähdytysveden tai ilman avulla vedeksi samaan tapaan kuin lauhduttimessakin. Tyypillisiä apulauhduttimen käyttötilanteita ovat nopeat kuormanpudotukset kuten paperikoneen ratakatko ja tilanteet, joissa prosessihöyryn kulutus on pienempi kuin kattilan minimikuorma. Korkean sähkönhinnan aikoina apulauhdutinta voidaan käyttää myös sähkötehon maksimointiin. Tällöin maksimoidaan turbiinin läpi kulkeva höyry ohjaamalla osa matalapainehöyrystä apulauhduttimeen. Energiansäästösyistä apulauhdutin ei ole jatkuvassa käytössä, joten sen käytössä on huomioitava käynnistysviive. Tällä on merkitystä etenkin paperikoneen ratakatkossa, jolloin apulauhdutin ei pysty välittömästi auttamaan höyrykuorman tasauksessa.

Apulauhdutin mallinnetaan venttiilinä yhtälön 8 mukaisesti. Yhtälössä venttiilin jälkeinen paine on apulauhduttimen paine. Mikäli apulauhdutin ei ole jatkuvassa toimintavalmiudessa, tarvitaan viivelohko kuvaamaan apulauhduttimen käynnistymiseen kuluva aikaa. Oletetaan poistettavan lauhteen pumppausteho riittäväksi, jolloin apulauhduttimen pinnankorkeuden käyttäytymistä ei tarvitse mallintaa. Tällöin riittää, että apulauhduttimelle määriteltyä suurinta sallittua lauhdutustehoa ei ylitetä.

2.7 Reduktio-, ulospuhallus- ja varoventtiilit

Reduktioventtiili on kahden painetason väliin asennettu paineenalennusventtiili, jonka avulla höyryä saadaan siirrettyä nopeasti alemmalle painetasolle. Turbiinin vikatilassa reduktioventtiilit ovat ainoa keino prosessihöyryn tuottamiseen. Reduktiossa höyryn lämpötila lasketaan alemman tukin lämpötilaa vastaavalle tasolle ruiskutusveden avulla, jottei tukin lämpötila lähde nousemaan reduktion käytön seurauksena. Tällöin reduktiolta tuleva höyryn massavirta kasvaa ruiskutusveden massavirran verran. Esimerkiksi KP/VP-reduktiolla tämä massavirran lisäys on noin 15 % [6, s. 220]. Reduktioventtiili-

leiden jatkuva käyttö on epätaloudellista, koska niitä käytettäessä ohitetaan turbiini ja menetetään sähkötehoa.

Ulospuhallusventtiilillä voidaan tarpeen tullen poistaa ylimääräinen höyry verkosta. Sen käyttö on paineenalennusmenetelmistä kaikista epätaloudellisim, koska tällöin menetetään sekä höyryn lämpöenergia että lauhde. Varoventtiilillä on sama toimintaperiaate, mutta se on sijoitettu korkeapaineverkkoon ehkäisemään tuorehöyryn paineen nousua yli sallitun rajan.

Ulospuhallus- ja varoventtiili mallinnetaan venttiiliyhtälöllä 8, jossa loppupaineena on ilmanpaine. Reduktioventtiili mallinnetaan puolestaan kahdessa osassa. Ensin lasketaan massavirta venttiiliyhtälöstä ja tämän jälkeen ruiskutuksen jälkeinen entalpia energiataseesta

$$h_2 = \frac{h_1 m_1 + h_v m_v}{m_1 + m_v}, \quad (15)$$

jossa h_1 on reduktioon tulevan höyryn entalpia, m_1 venttiiliyhtälöstä laskettu höyryn massavirta, h_v ruiskutusveden entalpia ja m_v ruiskutusveden massavirta. Reduktiosta poistuvan höyryn lämpötila saadaan höyrytaulukosta entalpian ja paineen avulla.

3 SÄÄTÖTEORIAA

Tässä luvussa esitellään säätötekniset menetelmät, joita työssä on käytetty. Ensin esitellään tavanomaisimpia asioita, joita ovat PID-säädin, integraattorin windup, myötäkylä sekä kaskadisäätö. Tämän jälkeen esitellään ÅF Consult Oy:n kehittämä Balance+-säätökonsepti, jota tässä työssä käytetään soveltuvin osin höyryverkon hallintaan. Lisäksi sitä käytetään kattilasäätöjen toteutuksessa niiden hyvän toiminnallisuuden takaamiseksi.

3.1 PID-säädin

Uusien ja kehittyneiden säätömenetelmien kehityksestä huolimatta edelleen selvästi suurin osa teollisuuden säädöistä tehdään PID-säätimillä. PI-algoritmi on oleellinen osa myös ÅF-Consult Oy:n Balance+ -konseptissa. PID-säädössä ohjaussignaali koostuu vahvistustermistä (P-osa), integroivasta termistä (I-osa) ja derivoivasta termistä (D-osa). Kaikkia säätimen osia ei yleensä tarvita. PID-säädön lisäksi teollisuudessa usein käytetään PI- ja PD-säätöä. PID-säätimen ulostulo eli ohjaus on seuraava

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (16)$$

jossa K_P on erosuureen vahvistus, e erosuure, K_I integraalin vahvistus ja K_D derivaatan vahvistus. Täten PID-säätimen siirtofunktio on seuraava

$$G_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s, \quad (17)$$

jossa s on Laplace-muuttuja. Vaihtoehtoinen rakenne säätimen toteutukselle on seuraava

$$u(t) = K_P \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (18)$$

jossa T_I on integrointiaika ja T_D derivointiaika. Tässä työssä käytetään yhtälön 16 mukaista esitystapaa.

Vahvistustermien tarkoitus on reagoida nopeasti erosuureeseen muuttamalla ohjausta erosuureen mukaisesti. Suurempi vahvistuksen arvo kasvattaa ohjauksen muutosta ja nopeuttaa säätöä, mutta lisää yleensä myös värähtelyä. Sen viritys on kompromissi nopeuden ja hyväksytyn värähtelyn väliltä. Pelkällä P-säädöllä ei yleensä saavuteta asetusarvoa tarkasti [15, s. 199].

Integraalitermi puolestaan huomioi erosuureen menneitä arvoja. Koska I-termi korjaa ohjausta niin kauan kuin erosuuretta esiintyy, saavuttaa stabiiliksi viritetty säädin lopulta asetusravonsa tarkasti. I-osan ongelmana voidaan pitää ohjauksen saturoituessa tapahtuvaa niin sanottua windup -ilmiötä, johon palataan luvussa 3.2.

D-osa pyrkii ennakoimaan erosuureen muutosta erosuureen derivaatan avulla. Täten se pystyy ennaltaehkäisemään erosuureen kasvua ja nopeuttaa säätöä. Todellisissa mittaus-signaaleissa on aina kohinaa, joten derivaatoissa ilmenee muutoksia korkealla taajuudella. Tämä saa D-osan ohjauksen arvot heittelemään rajusti laidasta laitaan. Ongelma voidaan poistaa tai ainakin sitä voidaan pienentää suodattamalla korkeataajuinen kohina pois. Mittauksen suodatus voidaan tehdä esimerkiksi seuraavanlaisella ensimmäisen kertaluvun suodattimella

$$G_f(s) = \frac{1}{1 + T_f s}, \quad (19)$$

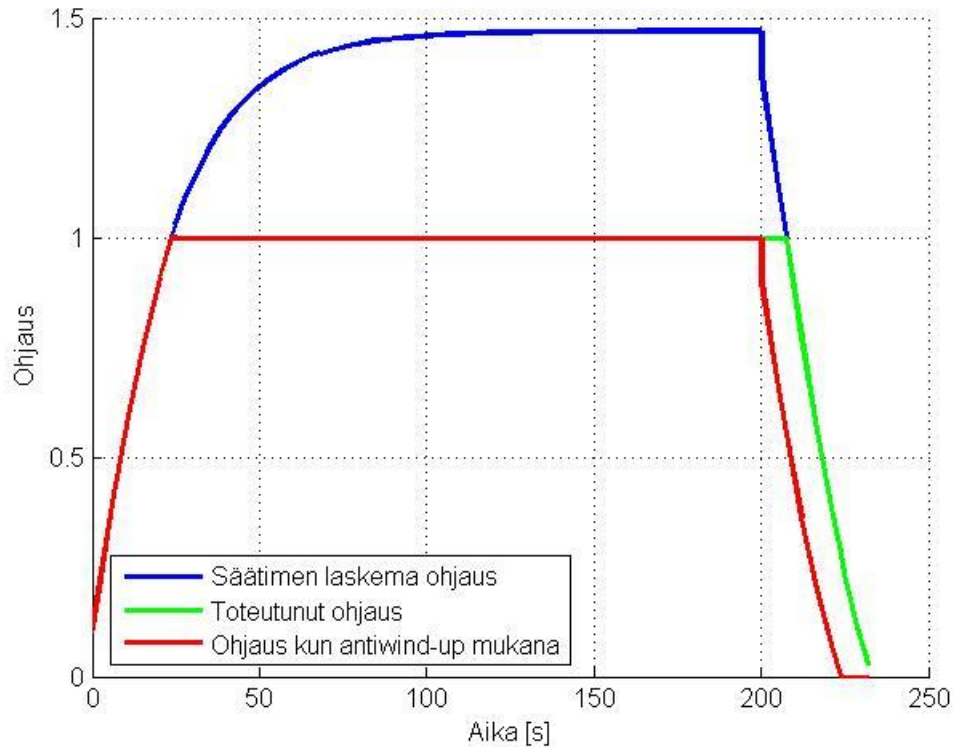
jossa T_f on suodattimen aikavakio. Jatkuva-aikaisten hitaiden prosessien tapauksessa ei yleensä käytetä D-osaa, koska D-säätö on tehotonta kyseisissä prosesseissa [15, s. 206]. Usein ei myöskään haluta reagoida voimakkaasti pieniin häiriöihin, joten D-säätöä ei suositeta kyseisissä prosesseissa senkään takia. Puhdasta D-termiä ei voida reaali-maailmassa toteuttaa, koska muutamat sen teoreettiset ominaisuudet ovat ei-toivottuja tai käytännössä epärealistisia. Se vahvistaa korkeataajuisia kohinaa, mitä ei missään nimessä haluta ja lisäksi se antaa askelvasteille äärettömän suuren ohjauksen [16, s.28]. Näistä syistä D-termin reaali-maailman toteutuksessa on oltava mukana alipäästösuodatus [17, s. 297].

3.2 Integraattorin anti-windup

Käytännön prosesseissa säätävillä toimilaitteilla on minimi- ja maksimiohjausarvot. Esimerkiksi täysin auki olevaa venttiiliä ei voida enempää avata eikä kiinni olevaa venttiiliä sulkea. Yhtälöstä 16 nähdään integroinnin kasvattavan ohjauksen itseisarvoa niin kauan kuin erosuureen etumerkki pysyy samana. Ohjauksen saturoituessa ääriarvoonsa integraattori jatkaa ohjauksen kasvattamista, vaikkei todellinen ohjaus enää kasva. Kun erosuure lähtee lopulta muuttumaan toiseen suuntaan ja säätimen tulisi tähän reagoida, voi integroinnin aiheuttama ohjaus olla kasvanut pitkälle säätimen toimintarajojen ulkopuolelle, jolloin säädin pitää ohjausta ääriarvossaan huomattavan kauan sen jälkeen, kun ohjauksen pitäisi muuttua. Ilmiötä kutsutaan integraattorin windup -ilmiöksi ja siitä päästään eroon niin sanotuilla anti-windup -ratkaisuilla, joilla estetään integraattorin ulostulon kasvu.

Windup -ilmiön vaikutus säätimen ulostuloon näkyy kuvasta 2. Kuvassa on simuloitu tilanne, jossa aluksi asetusrarvo nousee ja putoaa askelmaisesti takaisin alkuarvoonsa hetkellä 200 s. Sininen käyrä esittää säätimen laskemaa ohjausta, vihreä toimilaitteen todellista ohjausta ja punainen ohjausta, jossa anti-windup on käytössä. Toimilaitteen ohjauksen maksimiarvo on 1, minkä säätimen laskema arvo ylittää. Asetusravon puto-

nessa vahvistustermi pudottaa ohjausta välittömästi, mutta integraattorin ohjaus on kasvanut niin suureksi, ettei ohjaus pääse heti toimilaitteen todelliselle toiminta-alueelle. Jos integroinnin aiheuttama ohjauksen kasvu pysäytetään ohjauksen saturoituessa, havaitaan ohjauksen muuttuvan välittömästi asetusarvon muuttuessa.



Kuva 2: Integraattorin wind-up ilmiön vaikutus.

Matlabin Simulinkissä käyttäjä voi valita kahden anti-windup -menetelmän väliltä. Näistä ensimmäinen on nimeltään back-calculation ja siinä säätimeen on tehty sisäinen takaisinkytkentä, joka purkaa integraattorin latausta ulostulon saturoituessa ääriarvoonsa. Lohkokaavio ratkaisusta on esitetty kuvassa 3. Kuten kaaviosta näkyy, menetelmä tuo uuden viritysparametrin säätimelle. Vaihtoehtoinen menetelmä on nimeltään clamping. Siinä PID-säätimeen on sisäänrakennettu logiikka, joka pysäyttää integroinnin ulostulon saturoituessa [18]. Mikäli ohjauksen ääriarvot muuttuvat, on back-calculation -menetelmällä helpompi toteuttaa muuttuvat rajat yhdessä anti-windup:n kanssa. Clamping -menetelmän etu on se, että siihen ei kuulu ylimääräistä viritysparametria.

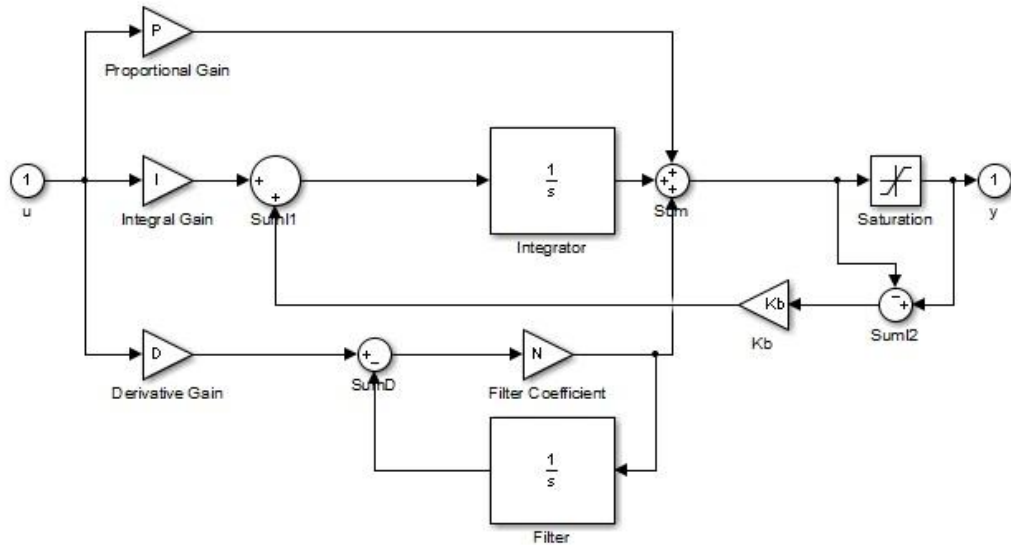
Back-calculation -menetelmän viritysparametrin K_b suurilla arvoilla integraattorin ohjausta saadaan tehokkaasti rajoitettua. Suuri K_b voi aiheuttaa myös väärienlaisia piikimäisiä ohjauksia sisääntulon nopeissa muutoksissa. Tämän vuoksi sitä ei saa virittää liian suureksi. Viritysparametri voidaan määritellä seuranta-aikavakion T_t avulla seuraavasti

$$K_b = \frac{1}{T_t}. \quad (20)$$

PID-säätimillä aikavakion kannattaa olla integrointiajan T_I ja derivointiajan T_D välillä. Viritykseen voidaan käyttää seuraavaa peukalosääntöä

$$T_t = \sqrt{T_I T_D}. \quad (21)$$

PI-säätimelle samaa yhtälöä ei voida käyttää. Tällöin hyvä alkuarvo seuranta-aikavakiolle on integrointiaika. [19.]



Kuva 3. Simulink -ohjelman back-calculation -menetelmä windup-ilmion hoitamiseen [18].

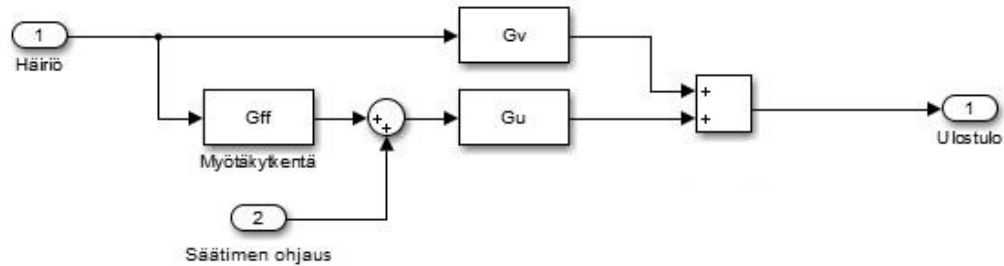
3.3 Myötäkytkentä

Myötäkytkentää käytetään mitattavissa olevien häiriöiden kompensointiin, joiden vaikutus prosessiin tunnetaan. Tarkoituksena on poistaa häiriöiden vaikutus ennen kuin ne ehtivät vaikuttaa säädettävän prosessin ulostuloon. Myötäkytkennän tehokkaalle toiminnalle on edellytyksenä, että häiriön vaikutus prosessin ulostuloon ei ole ainakaan merkittävästi säätimen vaikutusta nopeampi. Muussa tapauksessa kompensointi tapahtuu myöhässä.

Lohkokaavio myötäkytkennälle on esitetty kuvassa 4. Kuvassa G_v on siirtofunktio häiriöstä prosessin ulostuloon, G_u säätimen ohjauksesta prosessiin ja G_{ff} myötäkytkennän siirtofunktio. Myötäkytkentä pyritään toteuttamaan siten, ettei häiriö vaikuta prosessin ulostuloon. Tällöin myötäkytkennäksi valitaan

$$G_{ff} = \frac{G_v}{G_u}. \quad (22)$$

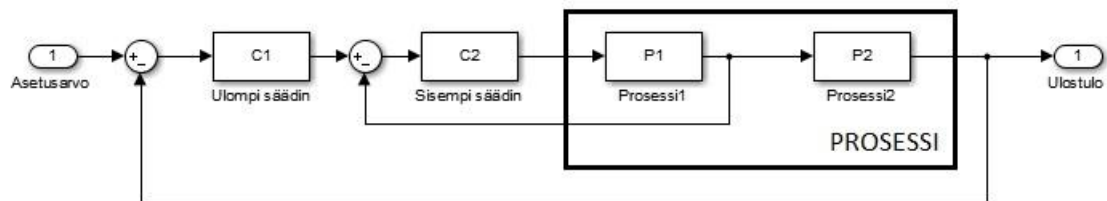
Aina tällä tavalla valittu siirtofunktio ei kuitenkaan ole toteutettavissa esimerkiksi siirtofunktion G_u siirtofunktiota G_v suuremman viiveen vuoksi. Tällaisissa tapauksissa tyypillisestä jätetään ei-realisoituva osa pois myötäkytkennästä tai käytetään vain staattista myötäkytkentää.



Kuva 4: Myötäkytkennän lohkokkaavio.

3.4 Kaskadisäätö

Kaskadisäädössä säätöjärjestelmä koostuu kahdesta tai useammasta sisäkkäisestä säätösilmukasta. Menetelmää voidaan käyttää, jos on käytettävissä useita mittaussignaaleita yhtä säätömuuttujaa kohden. Kaskadisäädöllä voidaan saada huomattavia parannuksia säätöön prosesseille, joissa on pitkiä viiveitä tai suuria aikavakioita. Kuvassa 5 on esitetty lohkokkaavio kaskadisäätökytkennästä, joka koostuu kahdesta sisäkkäisestä säätöpiiristä.



Kuva 5: Kaskadisäädön lohkokkaavio.

Kaskadisäädössä sisempi säädin viritetään nopeaksi, jotta se seuraa mahdollisimman tarkasti pääsäätimen asetuservoa. Pääsäädin viritetään puolestaan rauhallisemmaksi pääasiallisen säätökohteen hitaamman dynamiikan vuoksi. Esimerkkinä kaskadisäädöstä on pinnankorkeuden säätöpiiri, jossa pinnankorkeudensäädin antaa asetuservon alasäätimenä toimivalle virtaussäätimelle.

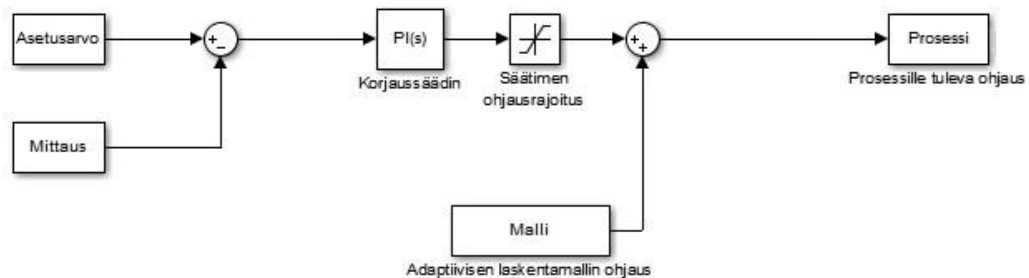
3.5 Balance+

Balance+ on ÅF-Consult Oy:n kehittämä säätökonsepti, joka perustuu yksinkertaisiin adaptiivisiin prosessimalleihin ja taseyhtälöihin yhdessä PI-säädinten kanssa. Balance+-konsepti voidaan implementoida kaikkiin moderneihin automaatiojärjestelmiin ja sitä on käytetty menestyksekkäästi kattilan tuorehöyryn lämpötilan ja paineen säätöön, kattilan ilmasäätöihin, läpivirtauskattiloiden tuliteho-vesi-tasapainon saavuttamiseen ja lieriön pinnankorkeuden säätöön.

Menetelmässä adaptiivisuus perustuu mitattaviin apumuuttujiin, joita käytetään sisäänmenoina laskentamalleille. Nämä mallit päivitetään prosessidatan historiatietojen perusteella. Esimerkiksi polttoaineen lämpöarvon muuttuessa mallin käyttämä virheellinen arvo korjataan prosessidatan ja laskentamallien avulla ja malli adaptoituu muuttu-

neisiin olosuhteisiin. Adaptiivisuuden ansiosta säätöjen viritykselle ei ole tarvetta enää käyttöönoton jälkeen. Adaptiivista säätöä voimalaitosten hallinnassa on hyödynnetty myös muualla maailmassa. On havaittu, että perinteiseen PID- säätöön verrattuna PID-säätimillä yhdessä adaptiivisen säädön kanssa on saatu merkittäviä parannuksia voimalaitoksen säätöjen suorituskykyyn [20]. Adaptiivisen säädön teoriaan voi perehtyä tutustumalla teokseen Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications [21]. Balance+ poikkeaa kuitenkin hieman adaptiivisesta säätöteoriasta, koska siinä säädinten parametrien sijaan päivitetään myötäkyläntälaskennan parametreja.

Adaptiivisuuden ohella keskeinen osa Balance+ -konseptia ovat taseyhtälöt, joiden avulla säädettävät prosessit saadaan paremmin pysymään tasapainossa. Menetelmässä taseyhtälöistä saadut ohjaukset lisätään varsinaisten säätimien ulostuloihin, jolloin ne toimivat myötäkyläntänä. Myötäkyläntän tarkoitus on antaa toimilaitteelle laskennallinen ohjaustarve. Tällöin PID- säätimet toimivat korjaussäätimien roolissa. Adaptiivisten mallien ansiosta taseyhtälöistä saadut ohjaukset saavat pidemmällä aikavälillä korjaussäätimen ohjauksen nollassi, jolloin PID-säädin ei aiheuta häiriötä prosessiin. Lisäksi korjaussäätimiä rajoitetaan usein siten, että lähellä tasapainoasemaa säädin saa tehdä vain pieniä ohjauksia tai se ei ohjaa ollenkaan. Tällä tavalla estetään turhat ohjaukset, jotka aiheuttavat häiriötä muualla prosessissa ja kuluttavat tarpeettomasti toimilaitteita. Vastaavasti kauempana tasapainotilasta ohjausta vahvistetaan, jottei ohjattava suure pääse karkaamaan liian kauas asetusarvostaan. Yksinkertaistettu Balance+ -konseptin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6. [22.]



Kuva 6: Esimerkki yksinkertaistetusta Balance+ -säätökaaviosta.

4 ESIMERKKILAITOS JA SIMULINK-MALLI

Tässä luvussa esitellään aluksi esimerkkilaitos, jolle työssä luotu Simulink -malli on tehty. Komponentit on mallinnettu luvussa 2 esiteltyjen yhtälöiden pohjalta, mutta joitakin yksinkertaistuksia ja kompromisseja on jouduttu tekemään, jotta simuloinnin aikaista laskentakuormaa saadaan kevennettyä ja laskennasta tulisi numeerisesti stabiilimpi. Nämä ratkaisut sekä komponenttien mitoitus käydään läpi laitoksen esittelyn jälkeen. Lopuksi esitellään Simulink –toteutuksessa käytetty X Steam –ohjelma sekä esitellään hieman erikoisempia sekä itse toteutettuja Simulink –lohkoja.

4.1 Höyryverkon rakenne ja toiminta

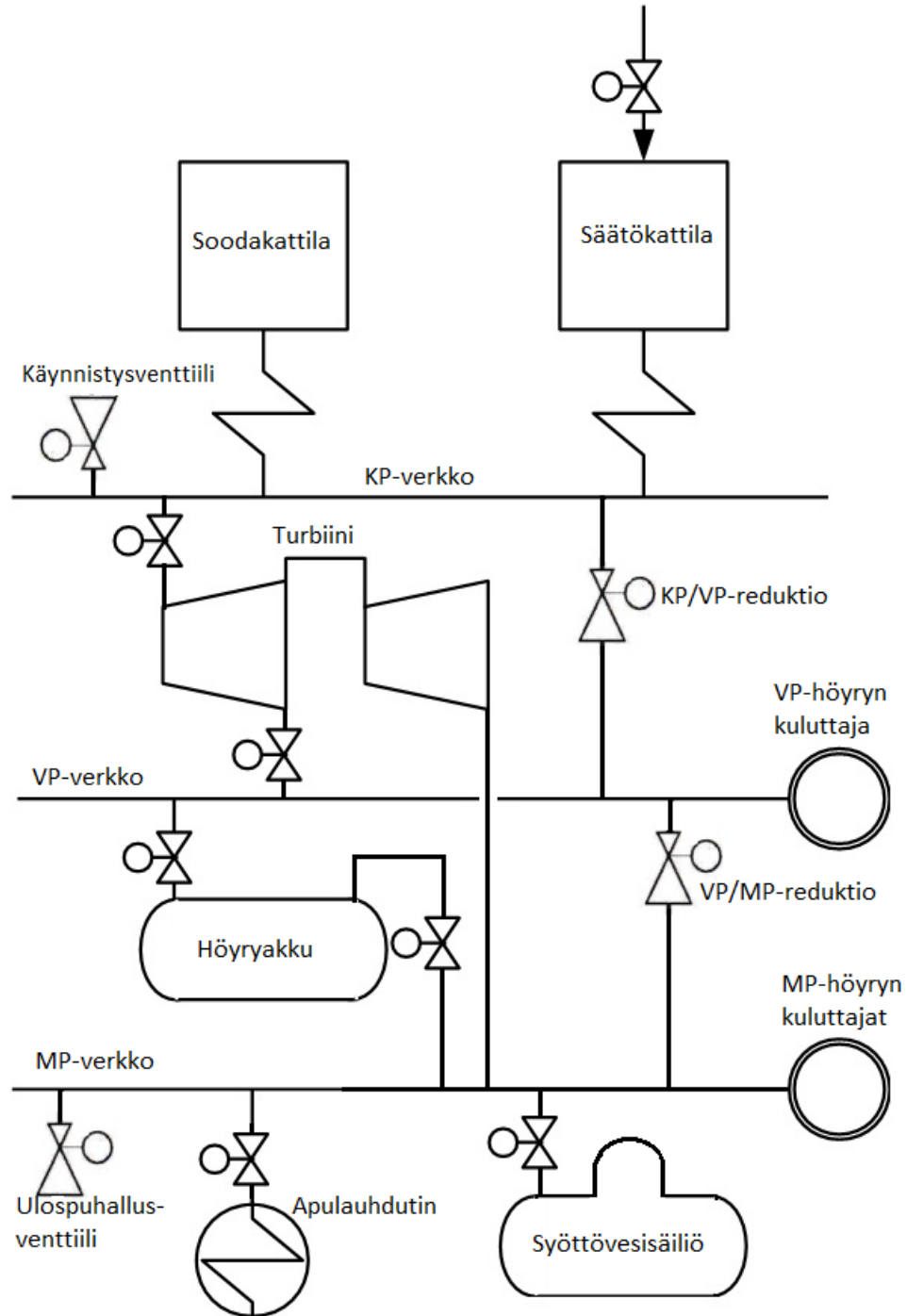
Kuvassa 7 on esitetty työssä tutkitun höyryverkon rakenne. Prosessin tarvitsema höyry tuotetaan sooda- ja säätökattilalla, joiden kummankin nimellisteho on 125 MW. Nimellistehoilla toimiessaan kattiloiden höyryntuotanto on yhteensä noin 90 kg/s ja tuorehöyryn lämpötila 520 C°. Kattiloista soodakattila toimii vakioteholla ja säätökattilan tehoa ohjataan höyryntarpeen mukaisesti. Säätökattilan suurin mahdollinen hetkellisesti saavutettava kuormanmuutosnopeus on noin 14 % nimellistehosta minuutissa eli noin 11 MW/min. Säätökattilan minimikuorma on 50 MW. Kummatkin kattilat tuottavat höyryä korkeapaineverkkoon.

Höyryverkko sisältää kolme eri painetasoa. Korkeapainehöyry ohjataan ensisijaisesti korkeapaineturbiinille, joka tuottaa sähköä ja samalla alentaa höyryn painetta sekä lämpötilaa. KP-linjassa on lisäksi reduktio- ja käynnistysventtiili, joilla höyryä saadaan poistettua KP-tukista. Turbiinissa on yksi väliotto, josta otetaan välipaineista höyryä prosessin tarpeisiin. Loppu höyry ohjautuu matalapaineturbiinin kautta matalapainetukkiin. Kattiloiden toimiessa nimellistehoillaan ja höyrynkuluttajien ollessa normaalisti ajossa turbiinin sähköteho on noin 60 MW.

VP-tukista otetaan normaalissa ajotilanteessa höyryä prosessin tarpeisiin 9 kg/s. VP- ja MP-tukkien välille on asennettu höyryakku kuormantasausta varten ja väliaikaiseen höyryn tuottamiseen höyryntuotannon häiriöiden varalle. Akun tilavuus on 298 m³. Sen koko on valittu siten, että akku pystyy kompensoimaan yhden paperikoneen ratakatkon tai ylösajon kattilan tehonmuutoksen ajaksi. Myös VP- ja MP-tukkien välillä on reduktioventtiili, jolla saadaan siirrettyä tarpeen tullen nopeasti höyryä VP-tukista MP-tukkiin.

Matalapainetukista otetaan höyryä prosessin tarpeisiin 75 kg/s. Syöttövesisäiliö on kytketty matalapaineverkkoon ja se kuluttaa höyryä normaalioloissa noin 5 kg/s. Normaalisti kaikki matalapainehöyry ohjataan prosessiin ja syöttövesisäiliöön. Kattilan tuotannon ollessa kulutushäiriöiden vuoksi liian suurta, voidaan höyryä ohjata myös apu-

lauhduttimeen ja ulospuhallukseen, mikäli häiriötä ei pystytä kompensoimaan lataamalla VP-höyryä akkuun. Tällöin myös höyryn virtausta syöttövesisäiliöön olisi taloudellista lisätä, mutta näin ei kuitenkaan aina tehdä.



Kuva 7: Esimerkilaitoksen höyryverkon rakenne.

KP-tukin painetta säädetään PI-säätimellä, joka ohjaa kattilan tulitehoa. VP-painetta säädetään puolestaan PI-säätimellä, joka ohjaa turbiinin väliottoventtiilin asentoa ja täten venttiilin läpi kulkevaa höyryvirtaa. MP-verkon paineensäätö toteutetaan turbiinin säätöventtiilillä, jota ohjataan niinkään PI-säätimellä. Kattilan hitaasta dynamiikasta johtuen tulitehoa ohjaava KP-paineen PI-säädin on viritettävä hitaaksi, kun taas VP- ja

MP-paineiden säätöön käytettäviä venttiileitä voidaan ohjata hyvin nopeasti. Säätojen tarkempaan toteutukseen palataan luvussa 5.

Höyryverkon paineiden asetusarvot on esitetty taulukossa 1. On huomattava, että VP- ja MP-höyrytukkien paineet eivät ole todellisuudessa samat höyryä käyttävällä tehtaalla kuin voimalaitoksella virtausvastusten aiheuttamasta paine-erosta johtuen. Suuremmalla kulutuksella höyryn nopeus kasvaa ja täten myös painehäviöt kasvavat [7, s.101]. Mitä pidempiä kyseiset höyryputket ovat, sitä merkittävämpi tämä ilmiö on. Tässä työssä käytetyssä mallissa asiaa ei kuitenkaan huomioida, vaan kunkin tukin painetta säädetään voimalaitoksen puoleisten paineiden mukaan.

Taulukko 1: Höyrytukkien paineiden asetusarvot.

	Asetusarvo
Korkeapainehöyry	90 bar
Välipainehöyry	12 bar
Matalapainehöyry	3,6 bar

4.2 Prosessin komponenttien mitoittaminen

4.2.1 Venttiileiden ja turbiinin mallintaminen

Höyryverkon komponenttien mallinnuksessa tarvittavat yhtälöt on käyty läpi luvussa 2. Mallinnuksessa tarvittavat venttiilivakiot on esitetty taulukossa 2. Turbiinin venttiilit mitoitettiin siten, että kattiloiden toimiessa nimellistehoillaan ja prosessin käyttäessä höyryä tasaisesti on säätöventtiili 80 % auki, jolloin paine-ero venttiilin yli on noin 5 bar. Väliottoventtiili on tällöin 75 % auki ja paine-ero sen yli on noin 3,5 bar. Tällöin venttiileille jää hieman säätövaraa myös suuremmille höyryn tarpeille. Väliottoventtiilille jätettiin hieman enemmän säätövaraa aukipäin, koska höyryakkua ladattaessa VP-höyryn kulutus kasvaa merkittävästi.

Taulukko 2: Venttiilivakiot.

	Venttiilivakio
Turbiinin säätöventtiili	7,3
Väliottoventtiili	2,1
KP-turbiini	2,2
MP-turbiini	7,8
KP/VP-reduktio	2,1
Varoventtiili	2,0
VP/MP-reduktio	14
Akun latausventtiili	4
Akun purkuventtiili	4
Syven höyryventtiili	17
Apulauhduksen höyryventtiili	7,5
Ulospuhallusventtiili	14

Säätö- ja väliottoventtiileiden yli olevat paine-erot eivät riipu pelkästään niiden venttiilivakioista. Kyseiset paine-erot määräytyvät pitkälti KP- ja MP-turbiinien yli olevista paine-eroista, jotka puolestaan riippuvat niille annetuista venttiilivakioista. Nämä vakiot määriteltiin siten, että paineenmuutos KP-turbiinissa on noin 66,5 bar ja MP-turbiinissa 15 bar. Tällöin entalpian muutos KP-turbiinissa on hieman MP-turbiinia suurempi. Väliottovirtaus pienentää MP-turbiinista saatavaa sähkötehoa. Sähkötehosta noin 60 % tuotetaan KP-turbiinilla ja loput 40 % MP-turbiinilla. Akkua ladattaessa joudutaan usein käyttämään KP/VP-reduktiota riittävän VP-höyryn tuottamiseksi, jolloin turbiini ohitetaan ja sähköteho pienenee.

Reduktiot mitoitettiin siten, että ne pystyvät tasaamaan paineen muutoksen turbiinin äkillisessä alasajossa ja täten korvaamaan turbiinin prosessihöyryn tuotossa. Venttiilivakiot määriteltiin hieman turbiinin vastaavia arvoja suuremmiksi, jotta niiden läpi pysytään ohjaamaan tarpeeksi höyryä kaikissa tilanteissa.

Höyryakun lataus- ja purkuventtiilit määritettiin siten, että niillä pystytään kompensoimaan hetkellisesti yhden paperikoneen höyrykuorma eli noin 15 kg/s. Syöttövesisäiliön höyryventtiili määritettiin olevan auki 30 % normaaliajossa, jolloin sen läpi kulkee höyryä 5 kg/s. Venttiilin mitoituksessa on jätettävä reilusti säätövaraa ylöspäin lauhteen puutteen varalle, jolloin joudutaan käyttämään runsaasti viileämpää lisävetä ja höyryn tarve syöttövesisäiliön paineen ylläpitämiseen kasvaa merkittävästi. Lisävesiventtiili mitoitettiin siten, että venttiilin ollessa täysin auki lisävesivirtaus on 40 kg/s. Syöttövesisäiliö on sooda- ja säätökattilan yhteisessä käytössä.

Höyryn verkosta poistamiseen käytettävät komponentit eli käynnistysventtiili, apulauhdutin ja ulospuhallusventtiili on mitoitettu siten, että niillä pystytään kaikissa tilanteissa poistamaan ylimääräinen höyry verkosta ilman liian suurta paineen nousua. Apulauhduttimen höyryventtiili mitoitettiin siten, että apulauhdutin pystyy lauhduttamaan MP-höyryä 15 kg/s ja ulospuhalluksella sitä pystytään puolestaan poistamaan 30 kg/s. Loppu höyry saadaan poistettua MP-verkosta varoventtiilillä myös tilanteessa, jossa apulauhdutin ei ole käytettävissä. Täysin auki oleva startti- eli käynnistysventtiili pystyy puolestaan poistamaan puolet tuotetusta höyrystä eli 45 kg/s.

4.2.2 Kattilan ja höyrytukkien mallintaminen

Poltto- ja höyrytehon välisen siirtofunktion (yhtälö 2) viive ja aikavakiot on valittu seuraavasti $t_d = 10 \text{ s}$ ja $\tau = 120 \text{ s}$. Tämän lisäksi merkittävä osa tuorehöyryn paineeseen vaikuttavasta aikavakiosta tulee KP-tukin tilavuudesta ja lieriöön varastoituneesta energiasta. KP-, VP- ja MP-tukkien tilavuudet on arvioitu hyvin karkeasti. Kyseisille tilavuuksille ei ole mitään yleispäteviä arvoja, koska ne riippuvat laitosten rakenteesta. MP-tukki on tilavuudeltaan suurin, koska siinä kulkee lähes 90 % tuotetusta höyrystä ja matalasta paineesta johtuen höyryn tiheys on pieni. Lisäksi putkisto on hyvin pitkä, sillä se kulkee voimalaitokselta kaikille paperikoneille. VP-tukki on tätä huomattavasti pienempi pienestä höyryvirrasta ja täten pienemmästä putkesta johtuen. KP-tukki on tältä väliltä ja se sisältää koko KP-höyrytilavuuden tulistimet mukaan lukien. Tukkien tilavuuksi-

en lisäksi simulointia varten on määriteltävä turbiinin säätöventtiilin ja KP-turbiinin välinen tilavuus sekä KP-turbiinin, MP-turbiinin ja väliottoventtiilin väliin jäävä tilavuus.

Käytetyn prosessimallin höyryverkot ovat dynamiikaltaan hitaita turbiinin dynamiikkaan verrattuna. Höyryverkkojen toimintaa voitaisiin simuloida tarkasti huomattavan pitkilläkin aika-askeleilla, mutta turbiinin nopeudesta johtuen koko simulointi on suoritettava pienellä laskentavälillä etenkin muutostilanteissa. Laskennan nopeuttamiseksi tasapainotilassa laskenta-algoritmiksi valittiin ODE45, jossa laskentaväliä muutetaan tarpeen mukaan [23]. Mikäli algoritmille annettu aika-askeleen yläraja on liian suuri, syntyy laskennan edetessä värähtelyä etenkin turbiinin ja säätöventtiilin sekä KP-turbiinin, MP-turbiinin ja väliottoventtiilin välisiin tiloihin. Näin käy siitä huolimatta, että laskenta-algoritmi pyrkii valitsemaan askelpituuden kullekin ajanhetkelle tarpeen mukaiseksi. Kyseiset tilavuudet ovat hyvin pienet suhteessa niihin virtaaviin ja niistä poistuviin massavirtoihin ja erot näiden massavirtojen välillä muuttavat kyseisten tilavuuksien painetta hyvin nopeasti ja saavat aikaan värähtelyä. Värähtely paineessa puolestaan aiheuttaa värähtelyä massavirroissa. Syntynyt värähtely pakottaa algoritmia pientämään aika-askeleen pituutta ja samalla laskenta hidastuu huomattavasti.

Turbiinin väliotossa oleva tilavuus KP-turbiinin, väliottoventtiilin ja MP-turbiinin välillä on mallinnettu todellista suuremmaksi paremman numeerisen stabiiliuden vuoksi. Samoin meneteltiin myös säätöventtiilin ja KP-turbiinin välisen tilavuuden kanssa. Nämä muutokset ovat merkityksettömiä kokonaisprosessin aikavakioiden kannalta, koska dynamiikka näissä vyöhykkeissä on tilavuuksien kasvattamisesta huolimatta selvästi nopeinta koko prosessissa. Kyseisten tilavuuksien dynamiikka on kuitenkin pulonkaula simulointiaskeleen pituudelle. Tarpeeksi lyhyen aika-askeleen käyttö toki antaa tarkkoja tuloksia ja pitää numeerisen ratkaisun stabiilina, mutta hidastaa laskentaa merkittävästi. Näiden kahden tilavuuden kasvattaminen antaa mahdollisuuden pidentää simulointiaskelta ja näin nopeuttaa simulointia.

Kattilan mallilla on kuvattu polttoainetehon muutoksen vaikutusta muodostuneeseen höyryvirtaan. Tämä malli ei suoraan kuvaa tuorehöyryn paineen ja kattilan tuottaman höyrytehon välistä dynamiikkaa. Se on huomioitava KP-tukissa lisäämällä kattilan höyrytilavuus tukin tilavuuteen. Vesi on käytännössä kokoonpuristumatonta, joten sen tilavuutta ei tarvitse huomioida. KP-tukin tilavuuteen lisätään siis lieriön höyrytilavuus eli noin puolet lieriön tilavuudesta. Todellisuudessa paineenmuutos vaikuttaa lieriöstä poistuvaan höyrymäärään siten, että paineen noustessa höyryä lauhtuu ja paineen laskiessa sitä höyrystyy lisää ja samalla lieriön vesitilavuuteen ja rakenteisiin varastoitunut energiasäilytys muuttuu. Tämä ilmiö tasoittaa paineen vaihtelua. Tässä työssä tämä on yksinkertaistettu mallintamalla KP-tukin tilavuus todellista suuremmaksi siten, että KP-tukin dynamiikka toimii halutulla tavalla. Kaikki simuloinnissa tarvittavat höyrytilavuudet on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3: Höyrytukkien tilavuudet.

	Tilavuus [m^3]
KP-tukki (sisältää lieriön vaikutukset)	200
VP-tukki	20
MP-tukki	400
Säätöventtiilin jälkeinen tila	1
Turbiinin välitila	1

4.3 Simulink -toteutus

4.3.1 X Steam

Työssä käytetään Matlabille tehtyä X Steam -ohjelmaa höyryn ominaisuuksien laskennassa. Höyryn ominaisuudet, jotka X Steam laskee perustuvat dokumenttiin IAPWS IF97 [24]. Kyseinen IF-97 standardi takaa erittäin tarkkoja arvoja höyrylle ja vedellä välillä 0-1000 bar ja 0-2000 C°. Ohjelma on toteutettu m-file muodossa. Laskentanopeus on optimoitu siten, että sisääntuloina käytetään painetta ja entalpiaa. Laskennan nopeuttamisen vuoksi näitä suureita kannattaa käyttää sisääntuloina muita suureita laskettaessa aina kun mahdollista. [25.]

X Steam -ohjelmaa käytettiin tässä työssä useassa paikassa. Sitä käytettiin kaikissa komponenteissa, joissa höyryn ominaisuudet muuttuvat. Höyrytukeissa sen avulla laskettiin höyryn paine ja lämpötila, kun höyryn tiheys ja ominaisentalpia tunnettiin. Syöttövesisäiliössä ja höyryakussa sitä käytettiin esimerkiksi säiliöiden paineiden laskentaan, kun niiden tiedetään olevan kylläisessä tilassa. Reduktioventtiileissä sen avulla saatiin jäähdytetyn höyryn lämpötila.

4.3.2 Simulink -lohkot ja niiden käyttötarkoitukset

Työssä käytettiin muutamia Simulinkissä harvemmin vastaan tulevia lohkoja. Nämä lohkot käyttötarkoituksineen on esitelty seuraavaksi. Yksinkertaiset ja yleisimmät lohkot on jätetty esittelemättä. Tarkat kuvaukset kaikista Simulink -lohkoista löytyy Matlabin dokumentoinnista [Matlab documentation 2014]. Valmiiden lohkojen lisäksi joidenkin lohkojen muokkaamiseen sekä tulosten käsittelyyn tarvitaan ohjelmointia, joka tehdään MATLAB –ohjelmointikielellä. Kyseinen ohjelmointikieli on esitelty lähteessä MATLAB Programming Fundamentals [26].

4.3.2.1 S-funktio

S-funktio on Simulink –lohko, jonka toiminnallisuuden käyttäjä voi itse määritellä. Työssä käytetään uudempaa Level-2 S-funktiota. Lohko tehdään käyttämällä MATLAB –ohjelmointikieltä, jonka avulla määritellään kaikki lohkon ominaisuudet, kuten sisääntulojen, ulostulojen ja tilojen lukumäärät sekä niiden ominaisuudet ja alkuarvot. S-funktio löytyy valmiina pohjana Simulink –kirjastosta, jonka käyttäjä voi muokata mieleisekseen.

S-funktio toimii aina samalla kaavalla. Ensin tehdään tarvittavat alustukset, jossa määritetään sisään- ja ulostulojen sekä tilojen lukumäärät. Ne voidaan määrittää joko jatkuvuiksi tai diskreeteiksi ja tämän jälkeen niille määritellään alkuarvot. Muita määritettäviä ominaisuuksia löytyy valtava määrä ja niihin voi tutustua Matlabin dokumentaation avulla. Ensimmäinen varsinainen laskentavaihe on ulostulon arvojen laskenta. Tämän jälkeen lasketaan tilojen derivaatat tilojen päivittämistä varten. Seuraavaksi simuloinnissa siirrytään aika-askel eteenpäin ja lasketaan kyseisen ajanhetken ulostulojen arvot uusien tilojen arvoja käyttäen.

Tässä työssä S-funktiolla on mallinnettu kaikki höyryputket eli KP-, VP- ja MP-tukki sekä turbiinin ja säätöventtiilin välinen tilavuus ja KP- ja MP-turbiinin sekä väliottoventtiilin välinen tilavuus. Myös syöttövesisäiliö ja höyryakku on mallinnettu S-funktiolla. S-funktioon on helppo sisällyttää massa- ja energiataseyhtälöt, joita kyseisten komponenttien mallinnuksessa tarvitaan. Edellä esitelty X Steam on helppo lisätä osaksi S-funktion koodia. Myös tarvittavat mallivakiot, kuten tukkien tilavuudet on helppo antaa parametreina. Mallista saadaan selkeämpi kokonaisuus S-funktiolla, kun kunkin komponentin malli on oma itsenäinen lohkonsa.

4.3.2.2 MATLAB Function

MATLAB Function –lohko on käyttäjän täysin vapaasti toteutettavissa oleva MATLAB –ohjelmointikielellä toteutettava funktio. Käyttäjä valitsee itse sisään- ja ulostulojen määrän ja ohjelmakoodissa lasketaan arvot ulostuloille. Tällä lohkolle ei ole selkeää ennalta määrättyä rakennetta toisin kuin S-funktiolla. Sillä ei kuitenkaan pystytä tekemään yhtä helposti monipuolisia mallirakenteita, jotka sisältävät esimerkiksi tilamuuttujia.

Tässä työssä kyseistä lohkoa käytettiin venttiilien mallintamiseen. Venttiilimallin voisi toteuttaa myös tavallisilla Simulink –laskentalohkoilla, mutta selkeyden vuoksi kukin venttiili mallinnettiin omana Function –lohkonaan. Reduktioventtiileissä lohkoon lisättiin entalpian laskenta luvun 2.7 mukaisesti sekä X Steam höyryn lämpötilan laskentaa varten.

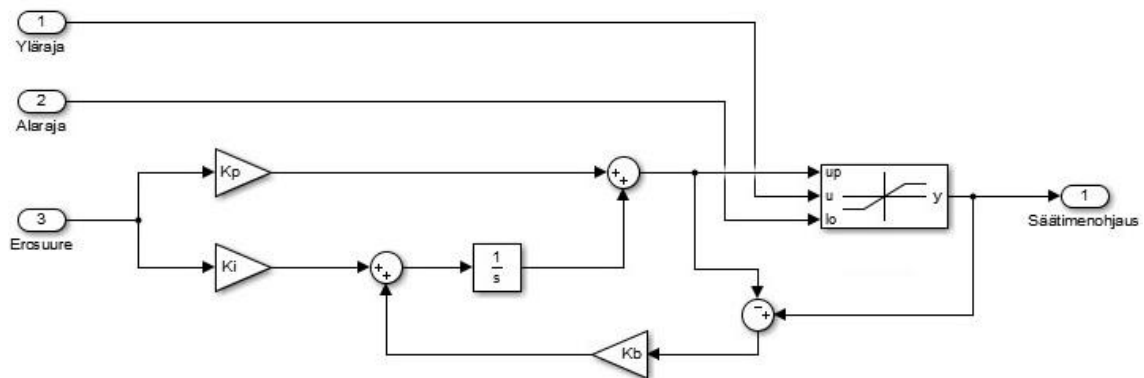
4.3.2.3 Lookup Table

Lookup Table on lohko, jonka avulla voidaan toteuttaa ulostulon epälineaarinen riippuvuus sisääntulosta. Lohkoon taulukoidaan sisääntuloja ja niitä vastaavia ulostuloja. Eri sisääntuloilla lohko interpoloi tai extrapoloi ulostulon arvoja tyypillisesti lineaarisesti viereisten pisteiden avulla. Arvot voidaan määrittellä myös vakioiksi tai ne voivat muuttua neliöllisesti pisteiden välillä.

Tässä työssä taulukointia käytettiin vain säätösuunnittelussa. Sen avulla toteutettiin myötäkyläkytkentöjä verkkojen paineista eri ohjauksiin ja virtausten rajoituksia esimerkiksi säiliöiden pinnankorkeuteen ja paineisiin perustuen. Taulukoita käytettiin myös säädin ohjauksen dynaamisesti muuttuvien äärirajojen tapauksessa. Koska taulukoissa käytetyt paineet muuttuvat hyvin vähän aika-askeleiden välillä, laskennan nopeuttamiseksi asetettiin taulukon seuraavan arvon laskenta alkamaan edellisestä laskentapistestä.

4.3.2.4 Anti-windupin sisältävä PI-säädin dynaamisesti muutettavilla ohjausrajoilla

Säätöjen toteutuksessa tarvittiin PI-säädintä, joka sisältää anti-windup –ratkaisun ja jonka ohjausrajoja voidaan dynaamisesti muuttaa. Tällaista lohkoa ei Simulinkistä kuitenkaan löydy. Lohko toteutettiin luvussa 3.2 esitetyllä back-calculation –menetelmällä, johon lisättiin dynaamisesti muuttuvat ohjausrajat. Lohkon rakenne on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: Anti-windupin sisältävä PI-säädin dynaamisesti muuttuvilla ohjausrajoilla.

Kyseistä lohkoa tarvittiin rajoitussäätimien toteutuksessa, jotta niiden ohjaukset saatiin pysymään aina pääsäätimen ohjauksen läheisyydessä. Toinen käyttökohde oli syöttövesisäiliön pinnankorkeuden säätö sekä akun paineen säätö taseratkaisussa, joissa ohjausrajat muuttuvat toimintapisteen mukaan. Lisäksi lohkoa käytettiin apulauhduttimen ohjausrajojen muuttamiseksi käynnistysviiveen vuoksi. Näihin säätöihin palataan tarkemmin luvussa 5.

4.3.2.5 Hit Crossing ja Data Type Conversion

Hit Crossing –lohkolla saadaan selville milloin jokin signaali ylittää tai alittaa tietyn määritellyn arvon. Lohkon ulostulo on tietotyyppiä Boolean. Muilla käytetyillä lohkoilla se on puolestaan tyyppiä Double, joten lohkon yhteydessä käytettiin Data Type Conversion –lohkoa muuttamaan signaali takaisin Double –tyypiksi.

Näitä lohkoja käytettiin tässä työssä vain apulauhduttimen käynnistysviiveen mallintamiseen. Kun apulauhduttimelle tulee käynnistys-signaali, tulee kyseinen ohjaus Hit Crossing –lohkoon merkinä apulauhduttimen käynnistämiseksi.

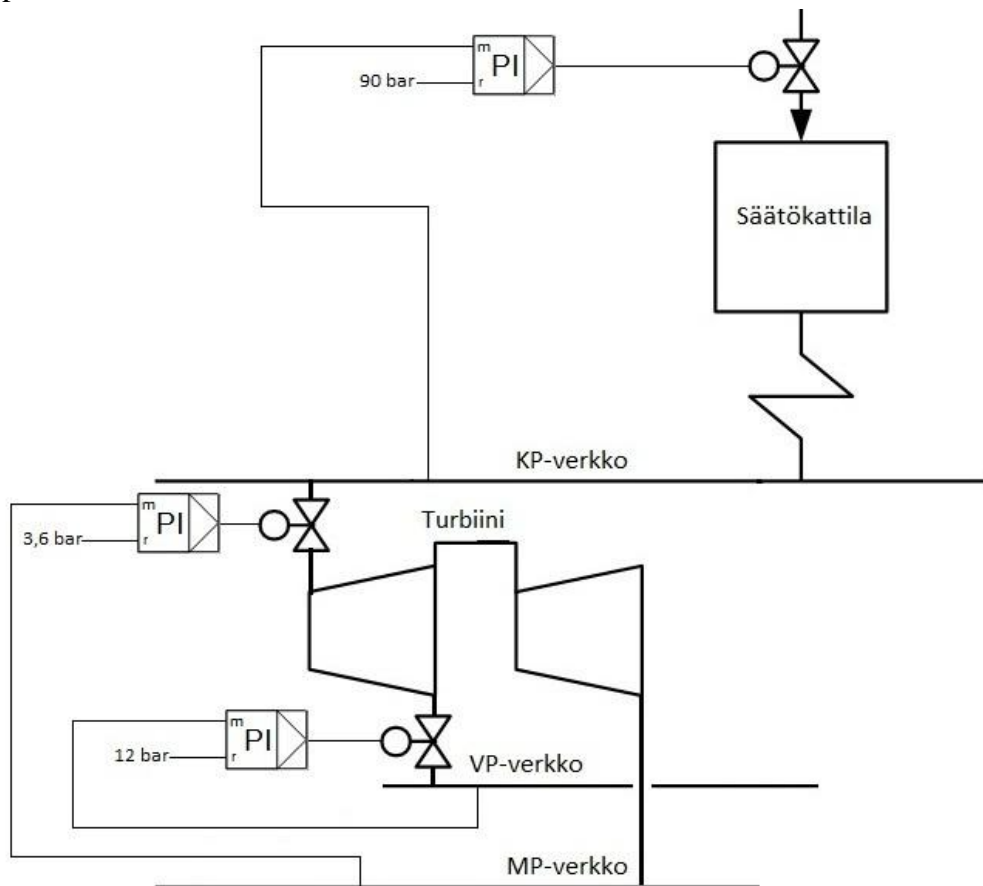
4.3.2.6 Signaaleiden rajoitus

Edellä esiteltyjen lohkojen lisäksi signaaleiden rajoittamiseen käytettiin useita erilaisia lohkoja. Signaaleiden ylä- ja alarajoja rajoitettiin Saturation –lohkoilla ja muuttuvien rajojen tapauksessa käytettiin Dynamic Saturation lohkoa. Dead Zone –lohkoa käytettiin joissakin virtaussäädöissä jäädyttämään ohjaus, mikäli mittausta on tarpeeksi lähellä asetusarvoaan tai lähellä nollaa. Rate Limiter –lohkolla rajoitettiin eri signaalien muutos-

nopeutta. Esimerkiksi höyryä käyttävän prosessin tehoramppi toteutettiin tällä lohkol-
la. Lisäksi eri signaaleiden väliltä halutun signaalin valitsemiseen käytettiin Min/Max –
ja Switch –lohkoja.

5 SÄÄDÖN TOTEUTUS

Tässä kappaleessa käsitellään höyryverkon säätöratkaisuja. Ensimmäisenä käsitellään yleisesti höyryverkon hallinnan tavoitteita. Tämän jälkeen esitellään höyryverkon perussäätöpiirit. Keskeisimmät pääsäätöpiirit ovat verkon paineiden säädöt, jotka on esitetty kuvassa 9. Alkuarvot säädinten viritysparametreille on arvioitu ÅF-Consult Oy:n vanhojen toteutettujen projektien pohjalta. Näitä parametreja hienosäädetään simulointien perusteella. Kattilan tehonsäätö toteutetaan Balance+ –konseptilla, mutta hieman yksinkertaistettuna jättäen mallien adaptiivisuus pois. Näin menetellään, koska tehtävät simuloinnit ovat niin lyhyitä, ettei kattilasäätöjen adaptiivisuudesta saada merkittävää hyötyä. Kattilan polttoainetehon säätöpiiri pitää sisällään myös KP-höyryn paineensäädön. VP- ja MP-paineiden säätö toteutetaan omilla PI-säätimillään, jotka ohjaavat turbiinin säätö- ja väliottoventtiiliä. Samoja säädinten viritysparametreja käytetään kaikissa työssä toteutetuissa höyryverkon hallintaratkaisuissa. Pääsäätöjen lisäksi tässä yhteydessä esitellään reduktioventtiileiden sekä varsinaisten tasauskomponenttien säätöjen toimintaperiaatteet.



Kuva 9: Periaatekuva höyryverkon paineiden säätöpiireistä.

Pääsäätiöpiirien toteuttamisen jälkeen esitetään höyrykuorman tasauskomponenttien hallintamenetelmät työssä toteutetuille ratkaisuille. Näistä ensimmäisenä esitellään perinteinen ratkaisu, jossa syöttövesisäiliötä ei ohjata tasaustarpeen mukaan. Tämän jälkeen esitellään höyryverkon tasepohjainen hallintamenetelmä, jossa myös syöttövesisäiliötä käytetään kuormantasaukseen. Lopuksi alkuperäiseen perinteiseen ratkaisuun lisätään MP-painerajoihin perustuva syöttövesisäiliön ohjaus. Tarkoituksena näillä kolmella vertailtavalla ratkaisulla on erotella syöttövesisäiliön lisäämisen sekä tasekonseptin hyödyt ja varmistua ettei niiden käytöstä ole haittaa höyryverkon hallinnassa.

Useissa paperitehtaissa tasauskomponenttien painerajat ja aktivoitumisjärjestys on valittu huonosti ja epätaloudellisesti. Esimerkiksi ulospuhallusta käytetään usein hyvin herkästi tasaisen höyrynpaineen varmistamiseksi. Kyseisten laitosten höyryverkon hallintaa voidaan tehostaa huomattavasti pienilläkin muutoksilla. Tässä työssä pyritään kuitenkin toteuttamaan myös perinteiset painerajoihin perustuvat ratkaisut mahdollisimman hyvin. Tällä tavalla kehittyneemmän taseratkaisun todelliset hyödyt saadaan paremmin esille ja tuloksia voidaan verrata järkevästi toteutettuun perusratkaisuun. Samasta syystä Balance+ -konseptia käytetään kaikissa ratkaisuissa kattilan tehon säädössä. Kattilasäädöillä on hyvin kriittinen merkitys höyryverkon hallinnassa. Balance+ -konseptin tiedetään suoriutuvan niistä hyvin, joten tasepohjaisen höyryverkon hallinnan tuomat mahdolliset hyödyt saadaan parhaiten esille käyttämällä Balance+ -kattilasäätöjä kussakin menetelmässä.

Tässä työssä ruiskutuksella tapahtuvan tuorehöyryn lämpötilan säädön oletetaan toimivan niin hyvin, että muodostuvan tuorehöyryn lämpötila voidaan olettaa vakioksi. Samoin reduktioissa oletetaan syntyvän höyryn lämpötilan olevan tarkasti halutussa arvossaan. Näillä oletuksilla kyseisiä säätöpiirejä ei tarvitse mallintaa ja samalla simuloinnin aikainen laskentakuorma pienenee. Tämä ei kuitenkaan tarkoita höyryn entalpi-an pysyvän vakiona, koska se riippuu lämpötilan lisäksi paineesta, mikä ei ole vakio.

5.1 Höyryverkon hallinnan periaatteet

Höyryverkon säädöillä pyritään varmistamaan tasainen höyryn tuotanto höyryä kuluttaville prosesseille. Prosessit tarvitsevat höyryä eri painetasoissa ja kukin painetaso on pidettävä jatkuvasti asetusarvonsa läheisyydessä. Prosessissa on voimakkaita ristikkäisvaikutuksia ja tämä on huomioitava säädön toteutuksessa. Voimakkaat ohjaukset yhden painetason säädössä vaikuttavat myös muihin verkon osiin. Mikäli verkon paineita pyritään pitämään liian tiukasti asetusarvoissaan, reagoivat säätimet voimakkaasti pieniinkin paineen muutoksiin ja samalla ohjaukset aiheuttavat häiriöitä muihin verkon osiin. Turhat ohjausliikkeet kuluttavat myös säätöventtiileitä ja muita toimilaitteita ja lisäävät täten huoltotarvetta. Prosessihöyryn paineiden säädössä absoluuttisen tarkka asetusarvojen seuranta ei siis ole tarkoituksenmukaista. Sen sijaan säädinten tarkoitus on pitää paineet tasaisina ja riittävän lähellä asetusarvoaan ilman turhia ohjausliikkeitä.

Korkeapainetukin höyryä ei käytetä suoraan prosessihöyrynä, joten sen paine saa elää prosessihöyryn paineita enemmän. Suuret muutokset KP-paineessa aiheuttavat kuitenkin ongelmia kattilasäädöille ja johtavat pahimmillaan koko prosessin alasajoon. KP-painetta säädetään ohjaamalla säätökattilan polttoainetehoa. Kattilan dynamiikka on kuitenkin hyvin hidas. Täten KP-paineen nopea säätö on käytännössä mahdotonta ja nopeat säätimen viritykset aiheuttaisivat voimakkaita yliohejuuksia KP-tukin paineeseen. Haasteen säätökattilan tehon säädölle luovat nopeat prosessihöyryn kulutushäiriöt, jotka on kompensoitava hitaalla säätökattilalla.

Höyryverkon kuormantasauskomponentit ovat toiminnaltaan nopeita, joten niillä voidaan väliaikaisesti kompensoida höyryn kulutushäiriöitä ja helpottaa säätökattilan kuormaa. Kattila ei joudu tekemään äärimmäisiä tehorampeja, kun kulutusmuutoksia pehmennetään höyryverkon tasauskomponenteilla. Tällöin vältetään voimakkailta tehon yli- ja aliohejuksilta ja samalla kattilaan kohdistuvat lämpörasitukset pienenevät merkittävästi. Höyryverkon säädöissä kuormantasausta pyritään toteuttamaan mahdollisimman energiataloudellisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa energiataloudellisimpien tasauskomponenttien tasausosuuden maksimointia ja vastaavasti energiaa tuhlaavien komponenttien tasausosuuden minimointia. Myös energiataloudellisesta näkökulmasta turhien ja liian voimakkaiden ohjausliikkeiden välttäminen on kannattavaa, jolloin toimilaitteet pääsevät helpommalla ja huoltokustannukset pienenevät.

5.2 Perussäätöpiirit

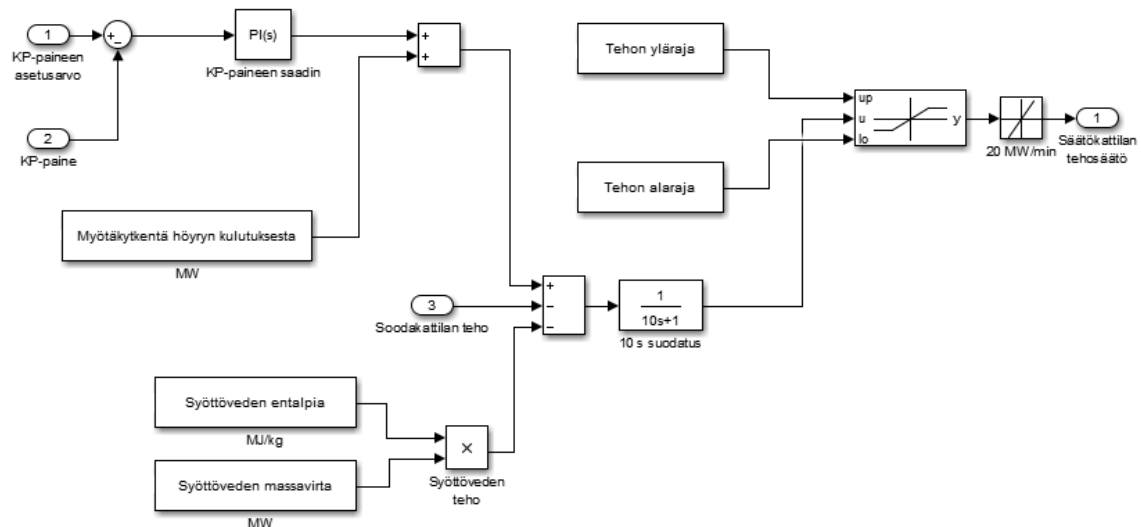
5.2.1 KP-paineen ja höyryntuotannon säätö

Korkeapaineisen tuorehöyryn painetta säädetään säätökattilan polttoaineteholla. KP-paineen säätö on viritettävä hitaaksi kattilan hitaan dynamiikan vuoksi. Hidas säätö samalla varmistaa, ettei kattila tee turhaan voimakkaita ohjausmuutoksia pienien tai lyhytkestoisten häiriöiden vuoksi. KP-paineeseen vaikuttaa myös turbiinin säätö- ja väliottoventtiileiden ohjaukset. Etenkin MP-höyryn kulutusmuutoksesta johtuva turbiinin säätöventtiilin asennonmuutos muuttaa KP-höyryn painetta huomattavasti nopeammin kuin kattila pystyy reagoimaan. Vaikutus on ongelmallinen, koska KP-paineen noustessa säätöventtiiliä on suljettava, jottei virtaus MP-tukkiin kasva. Venttiilin kuristus puolestaan nostaa KP-painetta entisestään. Näistä syistä KP-tukin paineen romahtaminen ja hallitsematon nousu on varmistettava säätöventtiilin ohjausrajoituksilla ja reduktioventtiilillä, jotka aktivoituvat korkeapaineen poistuessa sallittujen rajojen sisältä. Näiden lisäksi KP-tukin yläpainetta rajoitetaan käynnistysventtiilillä, jolla varmistetaan ettei paine ylitä suurinta sallittua rajaa. Käynnistysventtiiliä käytetään vain silloin, kun KP-painetta ei saada muilla keinoilla rajoitettua. Edellä mainittuihin rajoituksiin palataan kyseisten säätöpiirien esittelyn yhteydessä.

Kattilan hitaasta dynamiikasta ja prosessiin kohdistuvista häiriöistä johtuen pelkällä PI-säätimellä saavutettava KP-paineen säätötulos jää heikoksi. Tämän vuoksi kyseisessä säätöpiirissä hyödynnetään Balance+ -konseptia. Kuvassa 10 on esitetty yksinkertaistet-

tu periaatekuva kattilan höyrytehon säätöpiiristä. KP-höyryn painesäädin toimii ratkaisuissa korjaussäätimenä, joka korjaa laskennallista tehon ohjausta KP-paineen mukaan. Höyrytehon tarpeesta on poistettava soodakattilan ja syöttöveden tehot, jolloin jäljelle jää säätökattilan tehon tarve.

Polttoaineteholle on asetettu ylä- ja alarajat. Rajat riippuvat kattilan minimi- ja maksimikuormien lisäksi KP-paineesta siten, että suurilla paineilla kattilan tehon ohjausta ei saa nostaa. Vastaavasti alhaisilla paineilla tehoa ei saa laskea. Muulloin tehon ylä- ja alarajat saadaan kattilalle määritellyistä maksimi- ja minimitehoista. Tehon muutosnopeus on rajoitettu arvoon 20 MW/min pehmentämään hyvin nopeita tehon ohjausmuutoksia.



Kuva 10: Säätökattilan polttotehon periaatekaavio.

5.2.2 VP-paineen säätö

Välipainetukin höyrynpainetta säädetään turbiinin väliottoventtiilillä kuvan 9 mukaisesti. Paineen hallinta on melko helppoa venttiilin nopean dynamiikan ansiosta. Kyseiseen säätöpiiriin ei kohdistu rajoituksia muista verkon osista. Tämän vuoksi piirin Simulink –säätökaaviota ei esitellä. Koska VP-höyryn tarve on tyypillisesti huomattavasti MP-höyryn tarvetta pienempi, ei väliottoventtiilin ohjausmuutoksista aiheudu merkittäviä häiriöitä MP- ja KP-tukkeihin. Poikkeustilanteissa välipaineverkon paineensäätöä voidaan auttaa myös reduktioventtiileillä. Esimerkiksi matalapainehöyryn kulutuksen laskeissa voidaan joutua tilanteeseen, jossa väliotosta ei saada riittävästi höyryä säätöventtiilin sulkeutumisen vuoksi. Tällöin käytetään KP/VP-reduktioventtiiliä VP-höyryn riittävyyden varmistamiseksi. Myös höyryakkua ladattaessa höyryn ylituotannon yhteydessä voidaan joutua turvautumaan KP/VP-reduktioon VP-paineen ylläpitämiseksi.

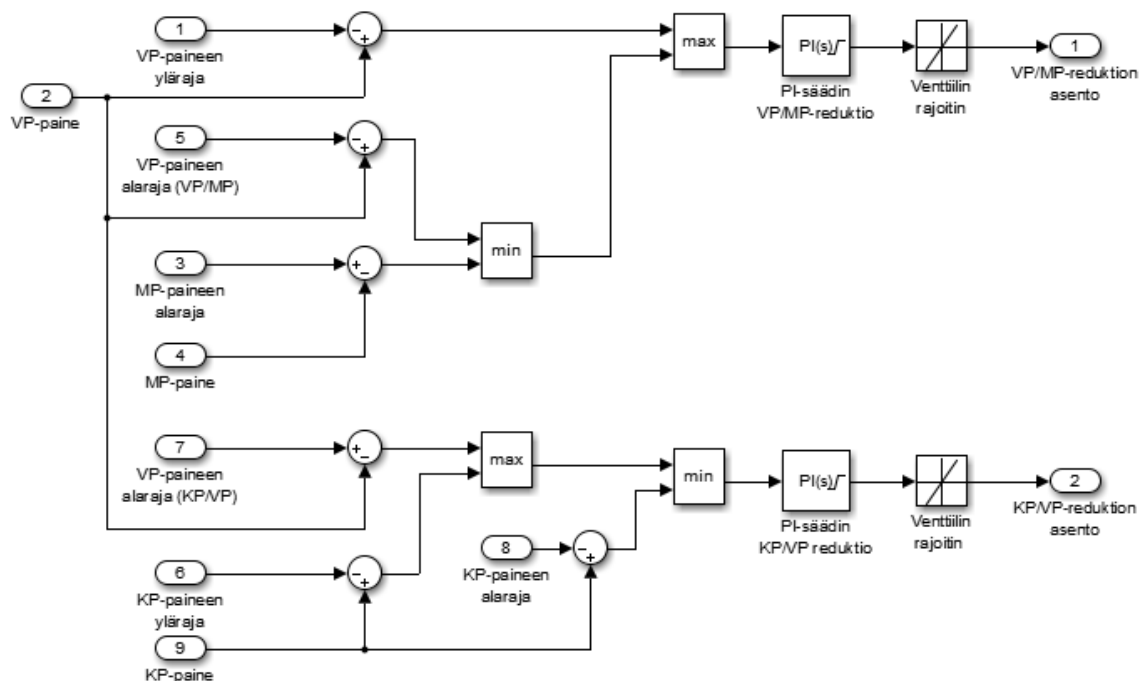
Jos kattiloiden höyryntuotanto on suurempaa kuin turbiinin kapasiteetti, alkaa KP-paine nousta. Kun KP-tukin paine on niin korkea, että se pakottaa KP/VP-reduktiota auki, ei väliottoventtiiliä ohjaamalla voida aina estää VP-tukin paineen nousua. Tällöin ylimääräinen VP-höyry ohjataan yleensä ensisijaisesti höyryakkuun, josta sitä voidaan

paineen ylläpidossa puretaan höyryä akusta, pienennetään mahdollisesti syöttövesisäiliön höyryvirtausta ja VP-paineen salliessa voidaan käyttää myös VP/MP-reduktiota. Pitkittyneessä höyryvajeessa matalapainetukin paine joudutaan tässä tapauksessa uhraamaan ensimmäisenä, kuten yleensäkin [27].

5.2.4 Reduktioventtiileiden säädöt

Reduktioventtiileiden ohjaukset perustuvat höyrytukeille määriteltymiin painerajoihin. Reduktioiden läpi meneville massavirroille ei ole yleensä mittausta, joten niiden hallinta kannattaa perustaa paineeseen. Tämä tarkoittaa, ettei niillä voi toteuttaa tasepohjaista säätöä, vaikka niiden läpi meneviä virtauksia voidaankin arvioida venttiilikäyrien avulla.

KP/VP-reduktion tehtävä on estää KP-paineen nousu yli sallitun ylärajan (94 bar) turbiinin kapasiteetin ollessa riittämätön. Lisäksi sillä estetään VP-paineen putoaminen alle sallitun alarajan (11,5 bar). KP-paineen alarajan (86 bar) tullessa vastaan, ei reduktio aukea alhaisesta VP-paineesta huolimatta. VP/MP-reduktion toiminta on periaatteeltaan sama. VP-paineen noustessa ylärajaan (12,5 bar) tai MP-paineen laskiessa alarajaan (3,5 bar) reduktio purkaa höyryä MP-tukkiin. VP-paineelle on asetettu alaraja (11,4 bar), jossa VP/MP-reduktio ei aukene alhaisesta MP-paineesta huolimatta. Turbiinin ollessa pois käytöstä VP- ja MP-tukkien paineensäätö toteutetaan KP/VP- ja VP/MP-reduktioilla. Tällöin VP-paineen alaraja muutetaan VP-paineen asetusarvoksi, jolloin KP/VP-reduktio pitää kyseisen paineen asetusarvossaan. MP-paineen alaraja vastaavasti muutetaan MP-paineen asetusarvoksi, jotta VP/MP-reduktio pitää MP-paineen asetusarvossaan. Tällöin verkon priorisointijärjestys säilyy ennallaan. Säättöpiirit reduktioventtiileille on esitetty kuvassa 12.

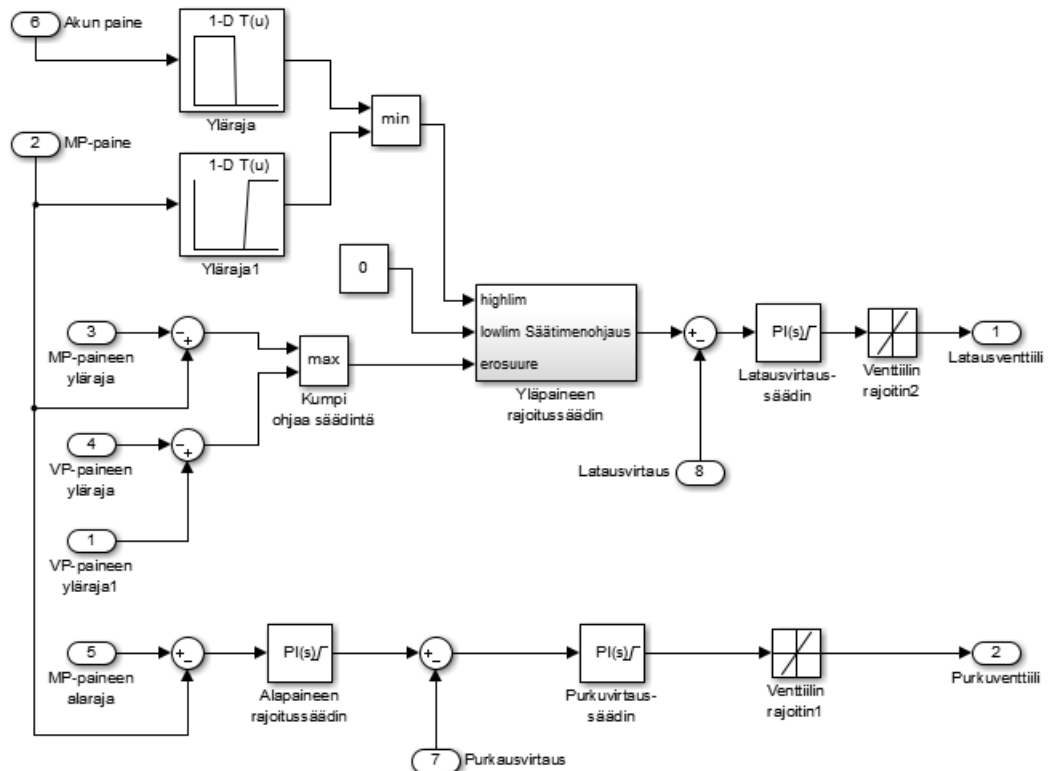


Kuva 12: VP/MP- ja KP/VP-reduktioiden säätökaaviot.

5.2.5 Höyryakun paineen ja pinnankorkeuden hallinta

Höyryakun paine ja pinnankorkeus eivät ole yleensä primäärisiä säätökohteita. Ne on kuitenkin huomioitava käytettäessä akkua paineen tasaukseen. Akun paineelle on yleensä aseteltu ylä- ja alarajat. Akku ei välttämättä kestä välipaineverkon painetta, jolloin sitä ei saa ladata yli sallitun rajan. Alarajalle ei ole vastaavaa rakenteiden tuomaa rajoitusta, mutta usein myös alapainetta rajoitetaan. Akun käyttö ylä- ja alarajoilla on muutenkin tehotonta, koska näissä tilanteissa hyvin pieni paine-ero akun ja syöttävän tai purettavan tukin välillä pienentää höyryvirtauksen lopulta olemattoman pieneksi. Myös pinnankorkeudelle voidaan asettaa vastaavanlaiset ylä- ja alarajat, jotka rajoittavat akkuun tulevaa tai sieltä poistuvaa virtausta.

Tässä työssä höyryakku on mallinnettu siten, että kaikki sinne tuleva höyry lauhtuu välittömästi vedeksi. Tällöin aina paineen noustessa myös pinnankorkeus nousee ja päinvastoin. Tämä tarkoittaa sitä, että paineen ja pinnankorkeuden säädöillä sekä rajoituksilla ohjataan käytännössä samoja asioita. Tästä syystä pinnankorkeuden mittausta ja rajoitus on jätetty tässä työssä huomioimatta. Todellisuudessa pinnankorkeutta ei voi jättää huomioimatta, koska paineen ja lämpötilan laskiessa lämpöhäviöiden vuoksi höyryä lauhtuu ja akun pinnankorkeus nousee. Akun säädöt painerajoihin perustuvilla ratkaisuille on esitetty kuvassa 13. Taseratkaisussa akun säätö poikkeaa tästä huomattavasti. Ratkaisu esitellään kappaleessa 5.4.2.

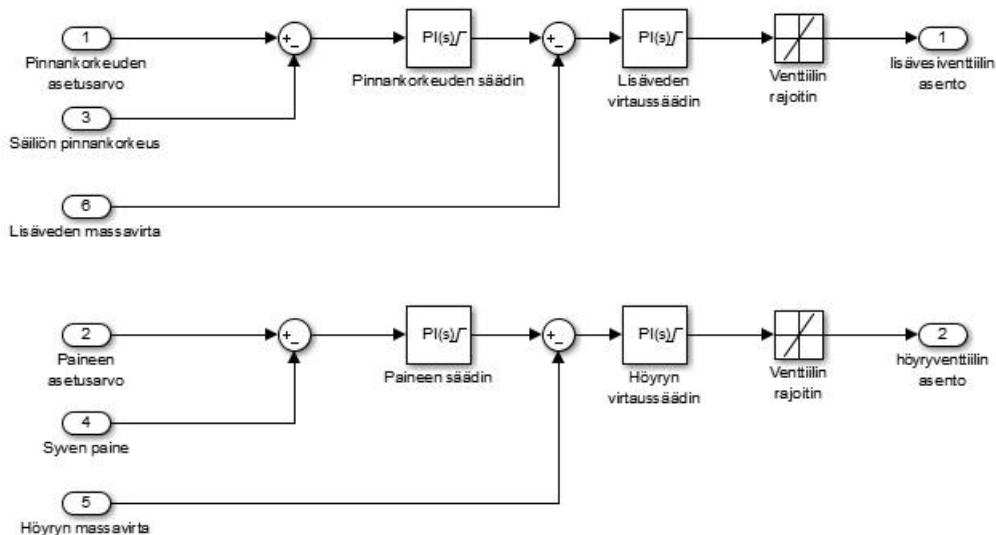


Kuva 13: Höyryakun lataus- ja purkuventtiileiden säätökaaviot.

5.2.6 Syöttövesisäiliön pinnankorkeuden ja paineen säätö

Syöttövesisäiliön painetta säädetään säiliöön otettavalla höyryvirtauksella. Pinnankorkeutta säädetään puolestaan lisävesivirtauksella. Pinnankorkeuden säätö on viritettävä hitaaksi, koska säiliön tarkoitus on toimia puskurina häiriöiden varalle. Nopea pinnankorkeuden säätö siirtäisi häiriöt syöttövesisäiliöstä muihin tärkeimpiin prosessisuureisiin. Syöttövesisäiliön pinnankorkeuden ja paineen säätöpiirit on esitetty kuvassa 14. Kyseisessä ratkaisussa syöttövesisäiliö ei osallistu höyrykuorman tasaamiseen.

Syöttövesisäiliön käyttö ei aiheuta mitään lisäkuluja tai tuotantomenetyksiä, joten sitä tulisi käyttää mahdollisimman paljon kuorman tasaukseen. Sen käyttö kuorman tasauksessa ei aiheuta ongelmia muuhun prosessiin, jos säiliön pinnankorkeus pidetään sopivasti määriteltujen ylä- ja alarajojen välillä. Näin syöttövesisäiliön toiminta virtausten puskurina ei häiriinny. Koska syöttövesisäiliötä ei käytetä laitoksissa yleensä kuorman tasaukseen, ei sitä käytetä siihen myöskään työssä toteutetussa taseratkaisun vertailukohtana käytettävässä perinteisessä ratkaisussa. Ratkaisuissa, joissa säiliötä käytetään tasaukseen, lisävesivirtaukseen tulee ylimääräinen tasaustarpeen mukainen ohjaus. Nämä esitellään kappaleissa 5.4.1 ja 5.5. On kuitenkin huomioitava, että kaikissa laitoksissa syöttövesisäiliössä ei ole höyryvirtauksen säätöventtiiliä. Tällöin säiliöön menevä höyryvirtaus elää syöttövesisäiliön ja MP-höyryn paine-eron mukaan. Tämänkaltaisissa laitoksissa syöttövesisäiliö toimii merkittävästi huonommin höyrykuorman tasauksessa kuin säätöventtiilillä varustetuissa laitoksissa, koska tällöin höyryvirtausta ei voida manipuloida yhtä tehokkaasti lisävesivirtauksen avulla.



Kuva 14: Syöttövesisäiliön pinnankorkeuden ja paineen säätöpiirit.

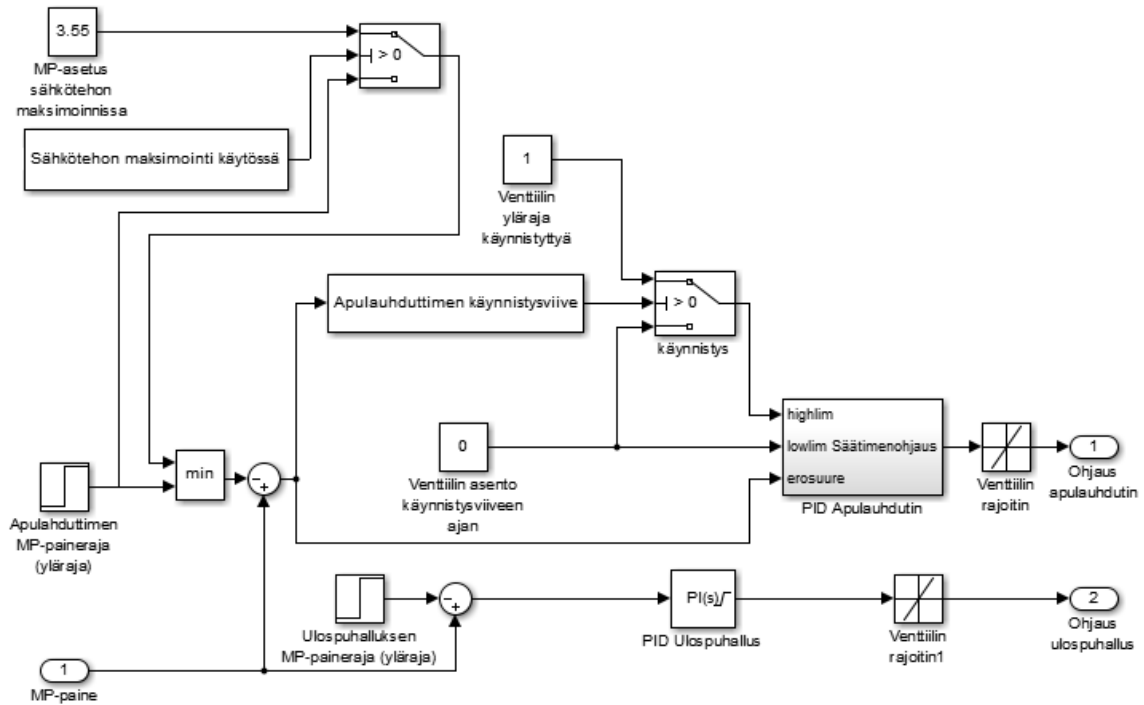
5.2.7 Apulauhdutin ja sähkötehon maksimointi sekä ulospuhallus

Apulauhdutinta ja ulospuhallusta ohjataan perinteisesti niille aseteltuihin paineen asetusarvoihin perustuen. Paineen ollessa komponentille asetetun asetusarvon alapuolella

venttiili pysyy kiinni. Apulauhduttimen ohjauksessa on huomioitava käynnistysviive. Se on huomioitu rajoittamalla venttiilin ohjauksen yläraja nollassi käynnistysviiveen ajaksi. Säädin sisältää anti-windup -ominaisuuden, jottei integraattori pääse kasvattamaan ohjausta käynnistysviiveen aikana.

Apulauhduttimen ohjaus voi tulla myös sähkötehon maksimoinnista. Kun sähkönnä myynnistä saadaan enemmän rahaa kuin siitä aiheutuu kuluja, kannattaa sähköntuotantoa pyrkiä maksimoimaan. Höyrytukkien paineet ja lämpötilat halutaan kuitenkin pitää kutakuinkin vakiona, jottei höyryä käyttävään prosessiin kohdistu ylimää räisiä häiriöitä. Tämän vuoksi sähkötehon lisäys on toteutettava nostamalla turbiinin läpi kulkevan höyryn massavirtaa. Kyseistä massavirtaa saadaan kasvatettua lisäämällä prosessihöyryn kulutusta keinotekoisesti ohjaamalla osa höyrystä apulauhduttimeen. Tällöin matalapainehöyryn kulutus kasvaa ja täten myös turbiinin läpi on kuljettava enemmän höyryä, jottei matalapainetukin paine laske. Apulauhduttimelle voidaan antaa binääritietona tieto sähkötehon maksimoinnin kannattavuudesta. Todellisuudessa sähkötehon maksimoinnissa on huomioitava myös rajoittavat prosessitekijät, kuten kattilan sallittu maksimikuorma, turbiinin maksimiteho, apulauhduttimen lauhdutusteho ja tarvittava säätövara häiriöiden varalle. Tässä työssä niitä ei ole huomioitu.

Sähkötehon maksimointi on toteutettu laskemalla apulauhduttimen paineasetusta hieman alle MP-verkon paineen. Tällöin säätöventtiili aukeaa ja turbiinin läpi menevä massavirta kasvaa. Sähkötehoa maksimoidessa apulauhduttimen MP-paineen asetusarvoksi on asetettu 3,55 bar. Toinen nopeammin toimiva ratkaisu on antaa apulauhduttimelle edellä lueteltuihin rajoihin perustuva asetusarvo lauhdutusteholle tai höyryn massavirralle. Tässä ratkaisussa on kuitenkin rajoituksilla huolehdittava etteivät verkon paineet putoa apulauhdutuksen vuoksi liian alas. Asia ei kuitenkaan kuulu tämän diplomityön ydinsisältöön, joten jälkimmäistä ratkaisua ei ole toteutettu eikä menetelmiä vertailtu. Periaate apulauhduttimen painerajoihin perustuvasta säätöpiiristä on esitetty kuvassa 15. Ulospuhallusventtiilin ohjaus koostuu kuvan mukaisesti puhtaasti yhdestä PI-säätimestä, jonka ohjaus on rajoitettu välille 0...1.



Kuva 15: Apulauhduttimen painerajoihin perustuva säätöpiiri.

5.3 Painerajoihin perustuva perinteinen ratkaisu

Painerajoihin perustuvassa ratkaisussa kullekin höyrynpaineen tasauskomponentille asetetaan omat painerajansa, jossa ne alkavat toimimaan. Nämä rajat asetetaan porrastetusti siten, että energiataloudellisin komponentti alkaa toimimaan aina ensimmäisenä. Jos taloudellisin komponentti ei riitä tasaukseen, otetaan käyttöön myös seuraavaksi taloudellisin, ellei sen käyttöä rajoita muut tekijät. Tasauskomponenttien painerajat perustuvat MP- ja VP-tukkien paineisiin. Toinen vaihtoehto on asettaa rajat KP-paineeseen perustuen [6, s. 220]. KP-tukki soveltuu mainiosti pienten häiriöiden kompensointiin, koska KP-paineen voidaan antaa heilua asetusarvonsa läheisyydessä. Valitsemalla painerajat prosessihöyryn paineisiin perustuviksi, voidaan KP-tukkia käyttää tehokkaammin puskurina häiriöille eikä pieniin häiriöihin tällöin reagoida niin herkästi. Tasauskomponenttien ohjaus prosessihöyryn paineiden mukaan on KP-paineeseen perustuvaa ratkaisua stabiilimpi, koska tasauskomponentit on kytketty prosessihöyrytukeihin. Edellä esitellyistä syistä johtuen perusratkaisun painerajat on valittu perustuvan prosessihöyryn paineisiin KP-paineen sijaan.

KP-tukin tilavuuden ja kattilan höyrytehon muutosnopeuden ollessa riittämätön häiriön kompensointiin, joudutaan rajoittamaan säätöventtiilin ohjausta. Tällöin se ei enää pysty pitämään MP-painetta asetusarvossaan ja joudutaan turvautumaan tasauskomponentteihin, jotta MP-paine saadaan pysymään sopivana. Jos säätöventtiilin ohjausrajoitukset eivät riitä KP-paineen hallintaan, aletaan pakko-ohjaamaan KP/VP-reduktiota sen mukaan pyritäänkö painetta ylläpitämään vai laskemaan. Viimeisenä KP-paineen kasvua rajoittaa käynnistysventtiili, joka tarpeen vaatiessa puhalttaa ylimääräisen höyryn ulos verkosta. Tämän lisäksi oikeassa prosessissa on varoventtiili, joka aukeaa tietyn

painerajan ylittyessä. Tässä työssä sitä ei kuitenkaan ole mallinnettu, koska viimeistään käynnistysventtiili pystyy poistamaan kaiken höyryn verkosta tarpeen vaatiessa. Keskenään ristikkäisissä ohjausvaatimuksissa KP-tukin ohjausrajoitus ohittaa aina VP- ja MP-tukkien ohjaukset.

VP-tukin paine saadaan normaaliajossa pysymään hallinnassa turbiinin väliottoventtiilillä. Kuitenkin tilanteessa, jossa turbiinin säätöventtiilin ohjausta rajoitetaan tai korkeapainereduktio on käytössä, tarvitaan tasauskomponentteja VP-paineen säilyttämiseksi. Ensimmäisenä VP-paineen noustessa aloitetaan lataamaan höyryä höyryakkuun. Mikäli akku ei riitä paineen tasaukseen tai se on täynnä, käytetään VP/MP-reduktiota. Jos VP-paineen laskiessa väliottoventtiili ei riitä paineen ylläpitoon, käytetään KP/VP-reduktiota ellei alhainen KP-paine rajoita sen käyttöä. VP-paineen laskiessa väliottoventtiilin avaamisesta huolimatta voidaan akkua purkaa, jolloin tuotetusta höyrystä riittää enemmän KP/VP-reduktion kautta VP-tukkiin ohjattavaksi. Jos VP-paineen pudotessa myös KP-paine on liian alhainen, menetetään VP-tukin paine.

Turbiinin säätöventtiilin ohjauksella pyritään ensisijaisesti säätämään MP-tukin painetta. Kun säätöventtiilin ohjaus on rajoitettu KP-paineen vuoksi tai paine verkossa nousee ohjauksista huolimatta, aletaan ensimmäisenä ladata höyryakkua, jolloin VP-höyryn kulutus kasvaa ja MP-tukkiin virtaa vähemmän höyryä. Mikäli paine jatkaa nousuaan, aktivoituu apulauhdutin ja lopuksi ulospuhallusventtiili. Paineen laskiessa ensin aloitetaan purkamaan höyryä höyryakusta. Tämän jälkeen avataan VP/MP-reduktioventtiiliä, mikäli korkeamman paineen höyrytukki sen sallii.

Perinteisessä painerajoihin perustuvassa ratkaisussa tasauskomponenttien käytölle on aseteltu painerajat edellä selitettyssä järjestyksessä. Painerajat on esitetty taulukossa 4. Tilanteissa, joissa samalle operaatiolle tulee ristikkäisiä ohjauksia, ylemmän verkon ohjaus ohittaa alemman verkon ohjauksen. Täten esimerkiksi KP-paineen alarajalla KP/VP-reduktiota ei avata, vaikka VP-paine olisi kuinka alhainen. Tällöin ainoa keino VP-paineen romahtamisen estämiseksi on höyryn kulutuksen rajoittaminen.

Taulukko 4: Kuormantasauskomponenttien painerajat perinteisessä ratkaisussa.

	Rajoitin	Asetus [bar]
KP-tukki 90 bar	Kattilan polttoteho	90
	Säätöventtiili auki	93
	KP/VP-reduktio auki	94
	Käynnistysventtiili	95
	Säätöventtiili kiinni	87
	KP/VP-reduktio kiinni	86
VP-tukki 12 bar	Väliottoventtiili	12
	Akun lataus	12,5
	VP/MP-reduktio auki	12,8
	Akun purku	11,5
	VP/MP-reduktio kiinni	11,2
MP-tukki 3,6 bar	Säätöventtiili	3,6
	Akun lataus	3,63
	Apulauhdutin	3,66
	Ulopuhallus	3,69
	Akun purku	3,55
	VP/MP-reduktio	3,5

5.4 Tasepohjainen ratkaisu

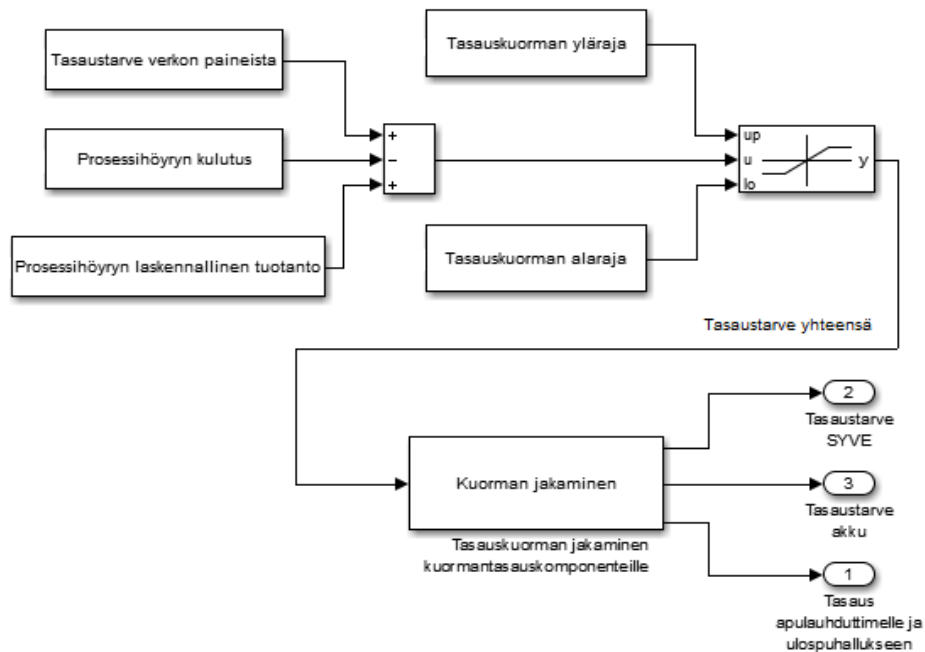
Tasepohjaisessa höyryverkon hallinnassa paineiden säätöpiirit ja niiden viritysparametrit säilyvät ennallaan, mutta tasauskomponenttien eli syöttövesisäiliön, höyryakun, apulauhduttimen ja ulospuhalluksen ohjauksia muutetaan merkittävästi. Taseratkaisu perustuu höyryn kulutuksen jatkuvaan seurantaan. Höyryn kulutuksen äkilliset muutokset pyritään tasaamaan tasauskomponenteilla siten että kokonaiskulutus ei muutu lyhyellä aikavälillä. Periaatekaavio kuorman tasaustarpeen laskennasta ja sen jaosta tasauskomponenttien kesken on esitetty kuvassa 16. Laskennallinen kuormantasaustarve saadaan prosessihöyryn kulutuksen ja kattilamallin avulla kuvan mukaisesti. Kattilamallin ulostulona saadaan kattilan prosessihöyryn tuotanto, joten vähentämällä siitä prosessihöyryn kulutus saadaan kuormantasaustarve.

Toinen vaihtoehto tasaustarpeen laskentaan olisi käyttää KP-tukista poistuvan höyryvirtauksen ja kulutettavan prosessihöyryn erotusta. Tätä vaihtoehtoa ei kuitenkaan valittu, koska prosessihöyryn kulutushäiriöt näkyvät viiveellisesti KP-höyryn virtauksissa. Käytettäessä prosessihöyryn virtauksia, saadaan tieto tasaustarpeesta välittömästi. Tällöin tasauskomponenteilla pystytään reagoimaan jo ennen kuin KP-virtaus muuttuu. Näin häiriön vaikutus KP-tukkiin on pienempi ja kattilaan kohdistuvat rasitukset pienenevät.

Tasaustarve ei ole aina peräisin muuttuneesta höyryn kulutuksesta, sillä häiriö voi tulla myös kattilalta. Esimerkiksi polttoaineen lämpöarvon muutos tai polttoaineen syöttöhäiriö voi aiheuttaa tarvetta höyrykuorman tasaukselle. Tämän lisäksi mallinnusvirheiden, heikosti viritettyjen säätöjen ja muiden mahdollisten epävarmuustekijöiden vuoksi tasauskuormaa vahvistetaan verkon paineista tulevalle myötäkylkennällä. Näin

kattilalla säilyy vastuu KP-paineen säädöstä ja tasauskomponentit vastaavat höyrykuorman tasauksesta lyhyellä aikavälillä sekä pienentävät kattilaan kohdistuvia kuormanmuutoksia.

Taselaskennan perusteella tasauskomponenteille jaettua tasausmäärää rajoitetaan KP- ja MP-paineiden mukaan siten, että alhaisilla paineilla rajoitetaan kuormantasauksen ylärajaa. Rajoituksella estetään tasauskomponenttien höyrynkulutus alhaisilla paineilla. Korkeilla paineilla rajoitetaan samaan tapaan tasauksen alarajaa. Näillä rajoituksilla ehkäistään tasauskomponenttien väärienlainen toiminta tilanteessa, jossa verkon paineet ovat jostain syystä päätyneet pois asetusarvojensa läheisyydestä. Esimerkki tästä on tilanne, jossa höyryn kulutus pienenee höyryverkon paineiden ollessa asetusarvojen alapuolella. Tällöin rajoitukset huolehtivat siitä, että paineet nostetaan lähelle haluttuja tasoja ennen kuin syöttövesisäiliötä ja höyryakkua aletaan lataamaan.



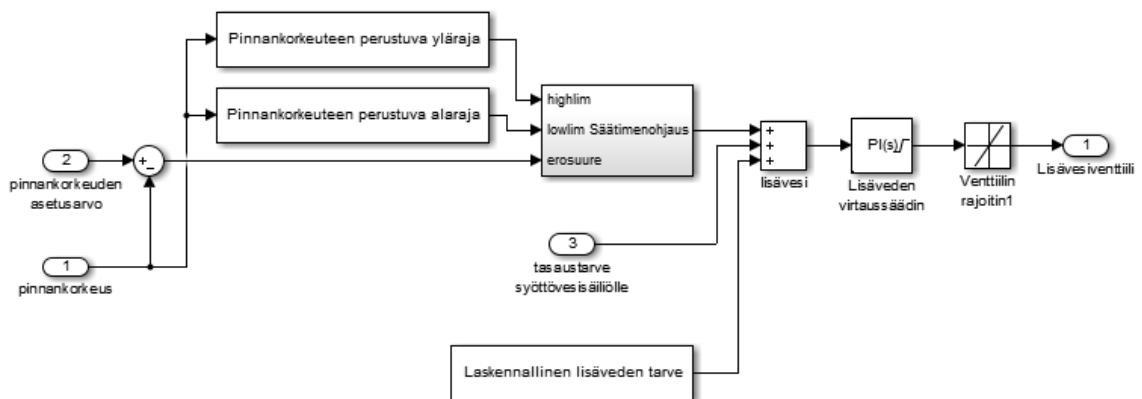
Kuva 16: Tasaustarpeen laskenta ja sen jakaminen tasauskomponenttien kesken.

Lopullinen tasaustarve jaetaan tasauskomponenttien kesken niille määritetyssä priorisointijärjestyksessä. Priorisointijärjestys perustuu komponenttien käyttökustannuksiin. Syöttövesisäiliön käyttö on taloudellisinta ja se pyrkii tekemään tasausta niin paljon kuin mahdollista. Jäljelle jäävä tasaustarve ohjataan höyryakulle, joka pyrkii tekemään sille ohjatusta tasauksesta niin suuren osan kuin mahdollista. Akun kapasiteetin ollessa riittämätön kuorman tasaukseen otetaan käyttöön apulauhdutin. Viimeisenä käyttöön otettavana tasauskomponenttina on ulospuhallusventtiili. Sitä voidaan joutua käyttämään lähinnä apulauhduttimen käynnistysviiveen ja suurimman mahdollisen lauhdutus-tehon riittämättömyyden vuoksi. Kullekin tasauskomponentille tulevasta tasaustarpeesta suodatetaan korkeataajuinen kohina. Tämä hieman hidastaa ohjausta, mutta tekee samalla ohjausmuutoksista pehmeämpiä. Tämä on ensiarvoisen tärkeää komponenttien eliniän kannalta ja samalla ohjausmuutosten aiheuttamat häiriöt vaimenevat. Lisäksi

kunkin komponentin osuutta tasaustarpeesta rajoitetaan siten, etteivät komponentit pääse tekemään kuormantasausta väärään suuntaan. Tällaiseen tilanteeseen voidaan joutua esimerkiksi höyryakun purkausvirtauksen ylittäessä hetkellisesti sille annetun tasaustarpeen, jolloin tämä kompensoitaisiin apulauhduttimella. Edellä esitettyjen kuvassa 16 näkyvien rajoitusten lisäksi kullakin tasauskomponentilla on omia käyttörajoituksiaan. Näihin rajoituksiin palataan kunkin komponentin ohjauksen käsittelyn yhteydessä luvuissa 5.4.1-5.4.4.

5.4.1 Syöttövesisäiliön ohjaus

Syöttövesisäiliön lisäveden ohjaus koostuu kolmesta osasta kuvan 17 mukaisesti. Ensimmäinen osa ohjauksesta tulee samalta pinnankorkeuden PI-säätimeltä kuin painerajoihin perustuvan ratkaisun tapauksessa. Ohjauksen suuruutta on rajoitettu tasapainotilan läheisyydessä, jotta säiliötä voidaan käyttää tehokkaammin kuormantasaukseen. Pinnankorkeuden lähestyessä sallittua ylä- tai alarajaa ei pinnankorkeuden säätimen ohjausta saa enää rajoittaa yhtä voimakkaasti. Näin säädin saa korjattua säiliön pinnankorkeuden takaisin vapaalle säätöalueelle, jossa säiliötä voidaan edelleen käyttää puskurina syöttöveden tarpeen ja lauhdevirtauksen muuttuessa. Toinen osa lisäveden ohjauksesta muodostuu edellisessä kappaleessa lasketusta suodatetusta kuormantasaustarpeesta. Viimeinen osa lisäveden ohjauksesta tulee laskennallisesta lisäveden tarpeesta. Edellä lueteltujen kolmen lisävesiohjauksen summa menee sisääntulona lisäveden virtaus-säätimelle. Kuvassa 17 ei ole esitetty syöttövesisäiliön paineen säätöpiiriä, koska se on identtinen kuvan 14 kytkennän kanssa.



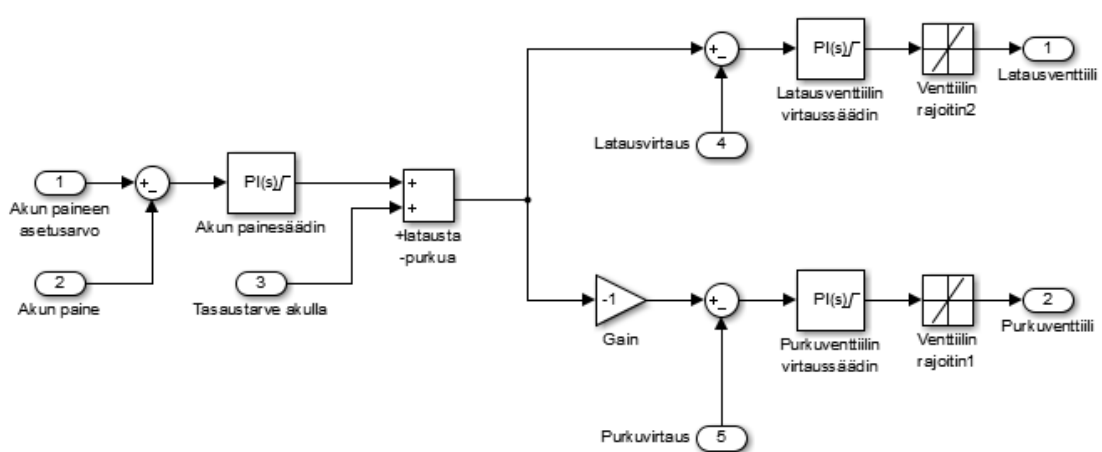
Kuva 17: Syöttövesisäiliön lisäveden säätö taseratkaisussa.

Työssä toteutetulla ratkaisulla säiliötä käytetään kuormantasaukseen niin tehokkaasti kuin mahdollista siten, ettei säiliön painetta muuteta. Ratkaisun toinen etu on se, että ohjauksessa mukana oleva laskennallinen höyryntarve pienentää huomattavasti tarvetta suurille pintasäätimen ohjausmuutoksille. Tällöin sen tehtäväksi jää vain virtauksen korjaus mallinnusvirheissä ja pinnankorkeuden asettaminen pitkällä aikavälillä takaisin asetusarvoonsa kuormantasauksen jälkeen.

5.4.2 Höryakun ohjaus

Höryakku on syöttövesisäiliön jälkeen seuraavaksi käytettävä komponentti hörykuorman tasaukseen, koska sen käyttö on syöttövesisäiliötä epätaloudellisempaa turbiinin osittaisesta ohittamisesta ja sähkötehon menetyksestä johtuen. Höryakku saa ohjauksensa tasaustarpeen laskennasta. Taseohjauksen lisäksi akkua ohjaa akun painesäädin.

Taseratkaisun höryakun yksinkertaistettu toteutus on esitetty kuvassa 18. Koska höryakkua säädetään sekä lataus- että purkuventtiilillä, on tasaustarve annettava molempien venttiileiden virtaussäätimille. Positiivinen tasaustarve tarkoittaa, että akkua on ladattava ja negatiivinen että sitä on purettava. Venttiilit aukeavat vain positiivisilla ohjauksilla, joten purkuventtiilin tapauksessa ohjauksen etumerkki on muutettava. Näin positiivinen tasaustarve saadaan avaamaan latausventtiiliä ja negatiivinen purkuventtiiliä.



Kuva 18: Höryakun säätökytkentä taseratkaisussa.

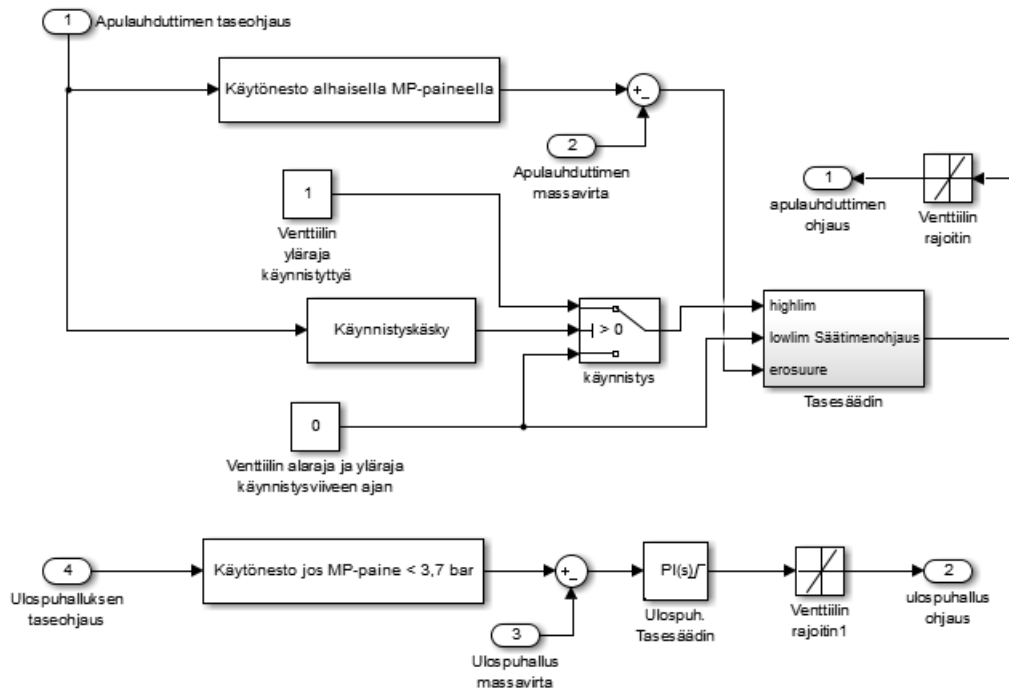
Taseohjauksen lisäksi höryakkua ohjaa korjaussäätimenä toimiva painesäädin, jonka tarkoitus on säätää akun paine pitkällä aikavälillä takaisin asetusarvoonsa 8 bar. Toisin kuin syöttövesisäiliön tapauksessa, akun paineen tai pinnankorkeuden karkaaminen kauas asetusarvostaan ei vaaranna muun prosessin toimintaa. Tämä johtuu siitä, että akku on puhtaasti paineen tasaukseen ja väliaikaiseen höryn tuottamiseen tarkoitettu komponentti. Syy akun painesäätimen olemassaololle on se, että sen avulla akku saadaan pitkällä aikavälillä tilaan, jossa se pystyy tuottamaan höryä sitä tarvittaessa tai varastoimaan höryä, kun sitä tuotetaan liikaa. Yksinkertaisuuden vuoksi painesäädin on kytketty pois käytöstä tässä työssä tehtävissä simuloinneissa. Todellisuudessa häiriön kompensoinnin jälkeen painesäätimen pitäisi kytkeytyä takaisin päälle, jotta höryakun paine saadaan takaisin asetusarvoonsa.

5.4.3 Apulauhdutin ja ulospuhallusventtiili

Mikäli syöttövesisäiliö ja höryakku eivät riitä höryn kulutuksen tasaukseen, otetaan käyttöön seuraavaksi taloudellisin tasauskomponentti eli apulauhdutin. Apulauhdutti-

men ja ulospuhalluksen virtaussäätimet saavat ohjauksensa taselaskennasta. Apulauhduttimen ohjaukseen on lisätty rajoitus, joka asettaa ohjauksen nolaksi MP-paineen laskiessa asetusarvonsa alapuolelle. Ulospuhalluksen käyttö on hyvin epätaloudellista, joten sitä käytetään vain pakon edessä. Tarpeettomia ohjauksia on rajoitettu siten, että ulospuhalluksen taseohjaus toimii vain suurilla MP-höyryn paineilla. Höyryn alijäämän tasaukseen apulauhdutin ja ulospuhallus eivät luonnollisesti osallistu, koska niillä pystytään ainoastaan poistamaan ylimääräistä höyryä verkosta.

Apulauhduttimen ja ulospuhalluksen perusratkaisusta tutut MP-paineen rajoitussäätimet jätetään ennalleen, jotta niitäkin voidaan tarpeen tullen käyttää. Apulauhduttimen ja ulospuhalluksen taseratkaisun ohjaukset on esitetty kuvassa 19. Painerajoihin perustuvat säätimet on yksinkertaisuuden vuoksi jätetty kuvasta pois.



Kuva 19: Apulauhduttimen ja ulospuhalluksen ohjaukset taseratkaisussa.

5.5 Painerajoihin perustuva ratkaisu syöttövesisäiliön kanssa

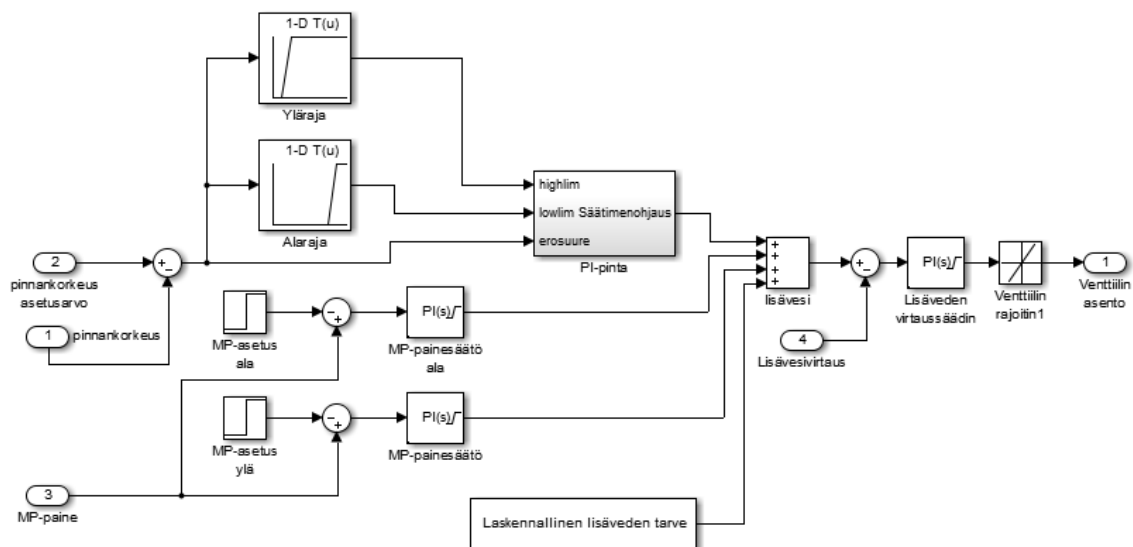
Suuri, selkeä ja melko helposti korjattavissa oleva puute kappaleen 5.3 painerajoihin perustuvassa ratkaisussa ja teollisuuden höyryverkossa yleensäkin on se, ettei syöttövesisäiliötä käytetä höyrykuorman tasauksessa. Lisäämällä syöttövesisäiliö kappaleen 5.3 perinteiseen ratkaisuun saadaan kuormantasauksen kapasiteettia kasvatettua ja akun, apulauhduttimen sekä ulospuhalluksen käyttöä pienennettyä. Lisättäessä syöttövesisäiliö painerajoihin perustuvaan ratkaisuun on muiden tasauskomponenttien MP-tukin paine-rajot hieman korotettava. Näin syöttövesisäiliö voidaan asettaa ensimmäisenä aktivoituvaksi tasauskomponentiksi ja tasauskomponenttien käyttörajoille saadaan riittävät paine-erot. Höyryakun painerajojen muuttaminen pienentää akun massavirtoja. Tästä

johtuen akun virtaussäätimiä on hieman nopeutettu tässä ratkaisussa. Päivitetyt MP-tukin paineisiin perustuvat rajat on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Tasauskomponenttien MP-painerajat, kun höyryakku on mukana tasauksessa.

Komponentti	MP-paineraja [bar]
Säätöventtiili	3,60
Syve lataus	3,63
Akun lataus	3,66
Apulauhdutin	3,69
Ulospuhallus	3,72
Syve kiinni	3,56
Akun purku	3,52
VP/MP-reduktio	3,48

Kuten taseratkaisun yhteydessä todettiin, käytettäessä syöttövesisäiliötä kuorman tasaukseen, kannattaa pinnankorkeuden säätimen toimintaa rajoittaa lähellä pinnan asetusarvoa. Tämä rajoitus aiheuttaa kuitenkin sen, ettei pintasäädin pysty huolehtimaan sopivasta lisävesivirtauksesta. Tämän vuoksi ohjaukseen on lisätty pintasäätimen rinnalle samanlainen laskennallinen lisäveden tarve kuin taseratkaisussakin. Tällä ratkaisulla lisävesiohjaukset pysyvät tasaisina hyvin laajalla pinnankorkeuden vaihteluvälillä. Syöttövesisäiliön käyttöä kuorman tasauksessa ohjataan kahdella lisäveden PI-säätimellä, joita ohjataan MP-paineen mukaan. Näistä toinen antaa negatiivisia ohjauksia eli pyrkii sulkemaan lisävesiventtiiliä MP-paineen ollessa alle säätimelle asetetun alarajan ja toinen antaa positiivisia ohjauksia eli avaa lisävesiventtiiliä, kun MP-paine nousee sille asetetun rajan yläpuolelle. Syöttövesisäiliön lisäveden ohjauksen säätökaavio painerajoihin perustuvalla ratkaisulla on esitetty kuvassa 20. Säiliön paineen säätöpiiri on samanlainen kuin edellä esitetyissä ratkaisuisissa.



Kuva 20: Painerajoihin perustuva syöttövesisäiliön lisävesivirtauksen säätö.

6 TULOKSET

Tässä luvussa vertaillaan edellä esiteltyjen säätöratkaisujen simulointituloksia ja pohditaan syitä tulosten eroavaisuuksille. Ratkaisuja vertaillaan paperikoneen pysyvässä ratakatkossa, 10 minuuttia kestävässä ratakatkossa ja polttoaineen lämpöarvon äkillisessä heikkenemisessä. Nämä ovat tyypillisiä ja merkittävimpiä häiriöitä, joita paperitehtaiden höyryverkkoihin kohdistuu. Hyvän höyryverkon hallintamenetelmän on selviydyttävä hyvin näistä kaikista. Luvun 6.1 eli ratakatkon tulosten yhteydessä eri tasauskomponenttien käytön, kattilan ohjausten ja nopeiden painemuutosten vaikutukset käydään läpi yksityiskohtaisesti ja samalla kerrataan edellisten lukujen asioita. Samoja asioita ei käydä yhtä yksityiskohtaisesti väliaikaisessa katkossa ja lämpöarvon heikentyessä eli luvuissa 6.2 ja 6.3. Kunkin luvun lopussa on lyhyt yhteenveto keskeisimmistä tuloksista. Lopuksi luvussa 6.4 pohditaan yleisesti tasekonseptin toimivuutta.

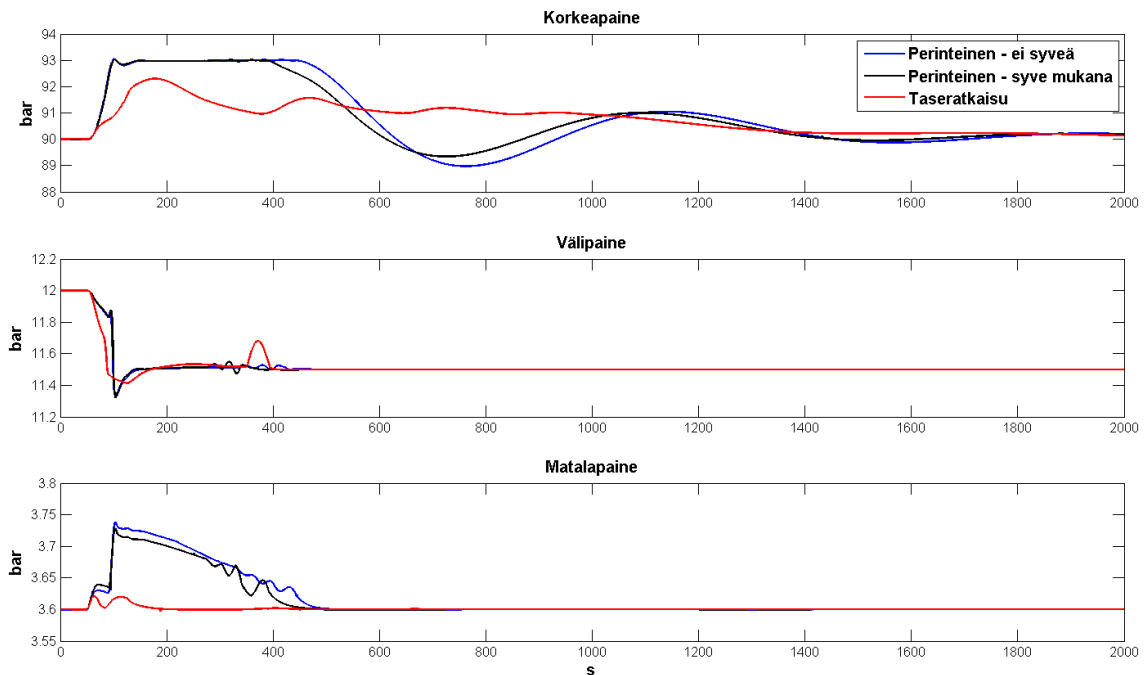
6.1 Pysyvä ratakatko

Ensimmäisenä simuloidaan pysyvää nopeaa ramppimaista kuormanpudotusta matalapaineverkossa, mikä useimmiten johtuu paperikoneen ratakatkosta. Ratakatko tapahtuu hetkellä 50 s, jolloin MP-höyryn kulutus laskee arvosta 75 kg/s arvoon 60 kg/s ramppimaisesti 75 s aikana. Simuloitu ajanjakso on 2000 s. Tämän simuloinnin tarkoitus on tarkastella kuinka nopeasti säätöratkaisut pystyvät stabiloimaan häiriön höyrytukkien paineissa ja kuinka suuria muutoksia häiriö aiheuttaa verkon paineisiin. Myös tasauskomponenttien ja säätökattilan ohjausten voimakkuudet sekä mahdolliset yliohtaukset ovat tärkeä tekijä. Tämän lisäksi merkittäviä tarkastelukohteita ovat tasauksesta aiheutuvat tuotantomenetykset apulauhduksen, ulospuhalluksen ja menetetyn sähkötehon muodossa.

6.1.1 Verkon paineet ja niiden ohjaukset ratakatkossa

Kuvassa 21 on vertailtu verkon paineita perinteisen painerajoihin perustuvan, tasepohjaisen ja painerajoihin perustuvan syöttövesisäiliötä hyödyntävän säätöratkaisun välillä. Kulutuksen putoaminen tapahtuu MP-verkossa. Tällöin MP-paineen nousua pyritään estämään sulkemalla turbiinin säätöventtiiliä, mikä puolestaan nostaa KP-tukin painetta. Merkittävä ero taseratkaisun ja perinteisten painerajoihin perustuvien ratkaisujen välillä on se, että taseratkaisussa tasaustarve jaetaan välittömästi tasauskomponenteille, jotka alkavat heti tasaamaan höyrykuormaa. Lisäksi taseratkaisussa tasausmäärää aletaan lineaarisesti kasvattamaan KP-paineen ylittäessä 91 bar. Näistä syistä taseratkaisussa KP-paine ei ehdi nousta niin korkeaksi, että säätöventtiilin ohjausta jouduttaisiin rajoitta-

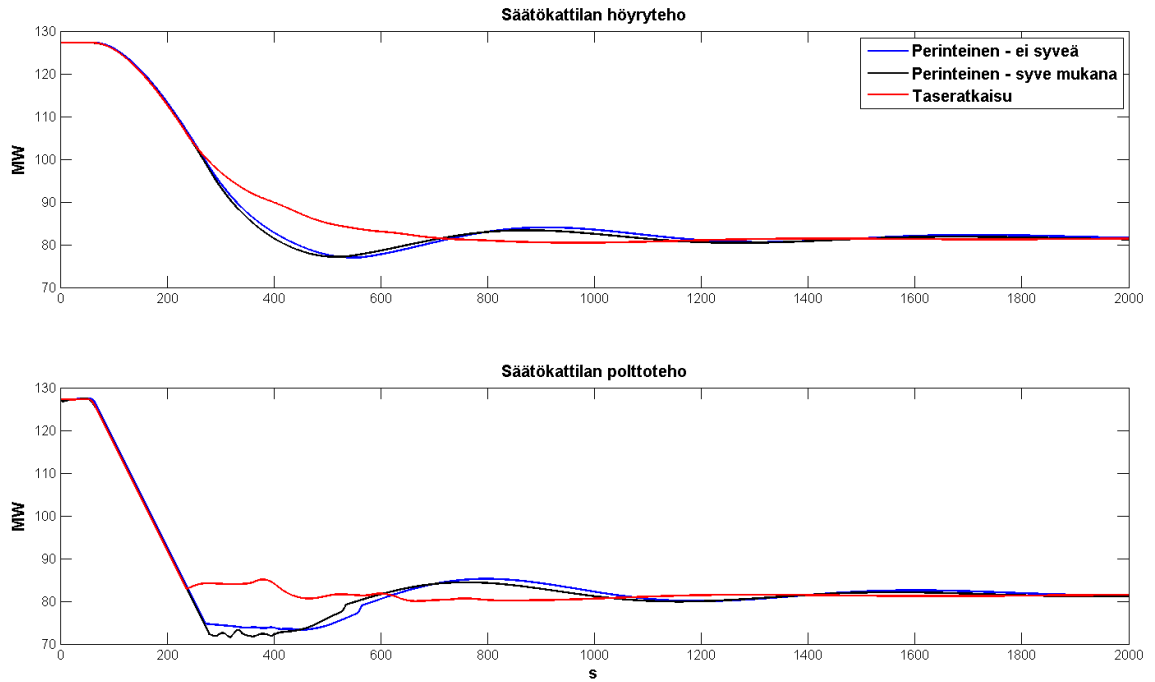
maan. Perinteisissä ratkaisuihin paineiden nousu saadaan hallintaan vasta, kun tasauskomponenttien säädinten erosuureet ovat kasvaneet tarpeeksi suuriksi. Tällöin korkea KP-paine rajoittaa säätöventtiilin toimintaa.



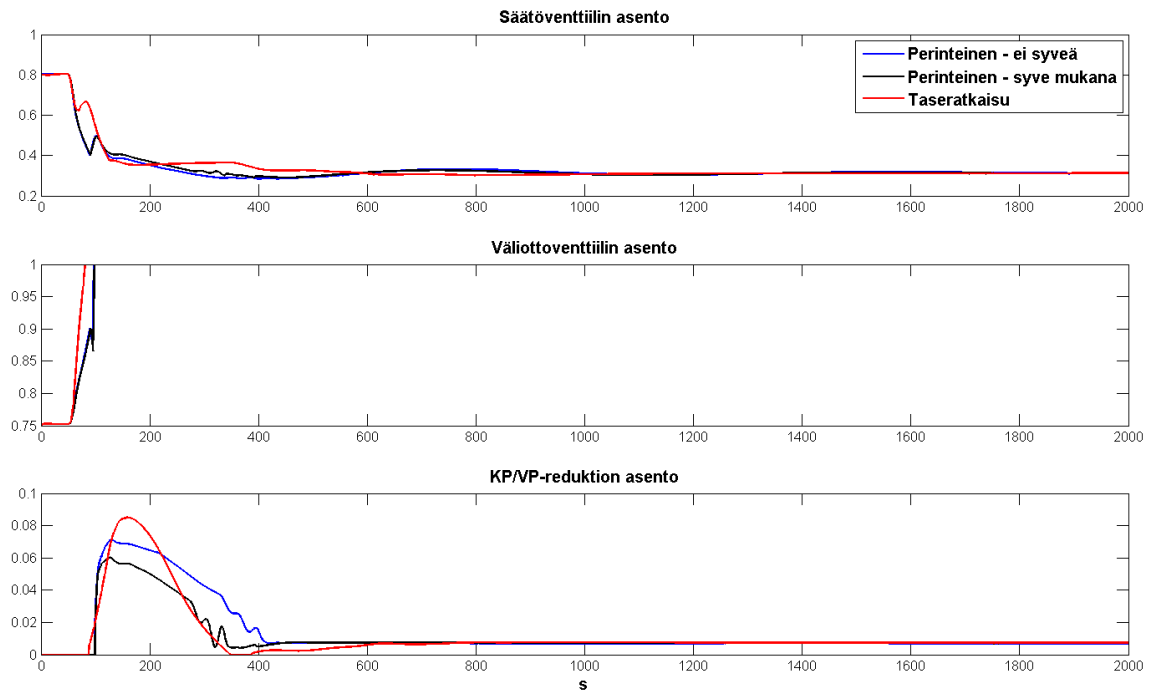
Kuva 21: Höyryverkon KP-, VP- ja MP-paineet ratakatkon yhteydessä.

Taseratkaisun pienemmän KP-paineen nousun vuoksi myös säätökattilan tehonmuutostarve pienenee. Tämä ilmenee kuvasta 22, jossa on esitetty säätökattilan höyry- ja tulitehot. Menetelmien väliset erot polttotehojen välillä ovat höyrytehojen eroja suuremmat, koska kattilan hidas dynamiikka pehmentää polttotehon muutosten vaikutusta höyrytehoon. Polttotehon nopeat muutokset muuttavat tulipesän lämpötilaa ja tämä aiheuttaa rasituksia kattilan muurauksiin. Tämän vuoksi taseratkaisulla saavutetut pienemmät tehon muutokset pienentävät pitkällä aikavälillä kustannuksia vähentyneen huoltotarpeen vuoksi.

Perusratkaisuissa tasauskomponentit aktivoituvat viiveellisesti yksi kerrallaan vasta MP-paineen noustessa komponenttikohtaisesti aseteltuihin raja-arvoihin. Tämä aiheuttaa sen, että näissä ratkaisuihin MP-paineen nousun estämiseksi säätöventtiiliä joudutaan sulkemaan aluksi nopeasti kulutuksen laskiessa. Tämä nähdään kuvasta 23. Tällöin KP-paine nousee hyvin nopeasti ja saavuttaa sille asetetun raja-arvon 93 bar, joka toimii säätöventtiilin rajoitussäätimen ylärajana. Tällöin säätöventtiili ei enää pysty säätämään MP-painetta, vaan paine määräytyy tasauskomponenttien tasauskapasiteettien ja niiden painarajojen perusteella. Kummassakin perusratkaisussa häiriön nopeudesta johtuen tarvitaan aluksi kaikkia tasauskomponentteja kuorman tasaukseen, mutta kattilan tehon laskiessa komponentit poistuvat käytöstä yksi kerrallaan. MP-paineen palautuminen asetusarvoonsa tapahtuu melko tasaisesti, eikä se aiheuta häiriöitä MP-höyryä käyttävälle prosessille.



Kuva 22: Säätökattilan höyry- ja polttoteho ratakatkon yhteydessä.



Kuva 23: Turbiinin säätö- ja väliottoventtiilin sekä KP/VP-reduktion ohjaus ratakatkon yhteydessä.

Taseratkaisussa MP-paine ei juurikaan muutu, mutta painerajoihin perustuvissa ratkaisuissa erosuure on enimmillään noin 0,15 bar. Sinällään MP-paineen eläminen noin 0,15 bar etäisyydellä asetusarvostaan ei välttämättä aiheuta ongelmia, koska höyryä käyttävä paperikone säätää sisään otettavaa höyryvirtausta höyrinpaineen mukaan siten ja pyrkii pitämään lämmitystehon vakiona paineen elämisestä huolimatta. Sen sijaan nopea muutos MP-paineessa on ongelma, koska se on häiriö paperikoneen höyryllä ta-

pahtuvalle kuivausteholle. Nopea höyrynpaineen muutos muuttaa paperikoneen kuivaustehoa, vaikeuttaa tehtaan muiden paperikoneiden säätöä ja aiheuttaa pahimmillaan lisää ratakatkoja. Nopea paineenmuutos aiheuttaa myös nopeita ohjaustarpeita tasauskomponenteille, joista puolestaan syntyy lisähäiriöitä prosessiin. Koska taseratkaisussa MP-paine pysyy kokoajan lähellä asetusarvoaan, ei edellä esitettyjä ongelmia voi syntyä.

PI-säätimissä anti-windup –menetelmänä käytetty back-calculation (luku 3.2) aiheuttaa sen, että nopeissa paineen muutoksissa säätimet antavat ei-toivottuja hetkellisiä piikkimäisiä ohjauksia. Ongelmaa voidaan pienentää pienentämällä vakiota k_b , mutta samalla windup –ilmiö pahenee. Kyseinen ilmiö aiheuttaa häiriöitä simuloinneissa käytetyllä säätöalgoritmilla, muttei ole ongelma todellisissa prosesseissa säädinten rakenteesta johtuen [28]. Tasaisesti muuttuvilla paineilla ongelmaa ei esiinny simulaattorissa.

Säätöjärjestelmä on toteutettu siten, ettei suurimpia häiriöitä lukuun ottamatta KP-paine pääse niin kauas asetusarvostaan, että se aiheuttaisi ongelmia muulle prosessille. Myös KP-tukin tapauksessa ongelmia aiheuttaa paineen nopeat muutokset ja värähtely absoluuttisen muutoksen sijaan. Taseratkaisussa KP-paineen muutokset ovat hyvin tasaisia. Siinä ei esiinny värähtelyä ja KP-painesäädin ajaa paineen hitaasti takaisin asetusarvoonsa. Tällöin KP-tukin paine ei aiheuta häiriöitä prosessihöyrytukkeihin, eivätkä säätö- ja väliottoventtiilit joudu tekemään voimakkaita ohjausmuutoksia muuttuvan KP-paineen vuoksi, kuten kuvasta 23 nähdään. Perinteisissä ratkaisuissa KP-paineen pysyessä arvossa 93 bar tuorehöyryn painesäätimen integraattorin ohjaus jatkaa pienenemistään, kunnes paine alittaa asetusarvonsa. Pitkään kestävästä suuresta eroarvosta johtuen säätimen ohjaus ehtii pienentyä niin paljon, että syntyy voimakas aliohjaus ja värähtelyä KP-paineeseen.

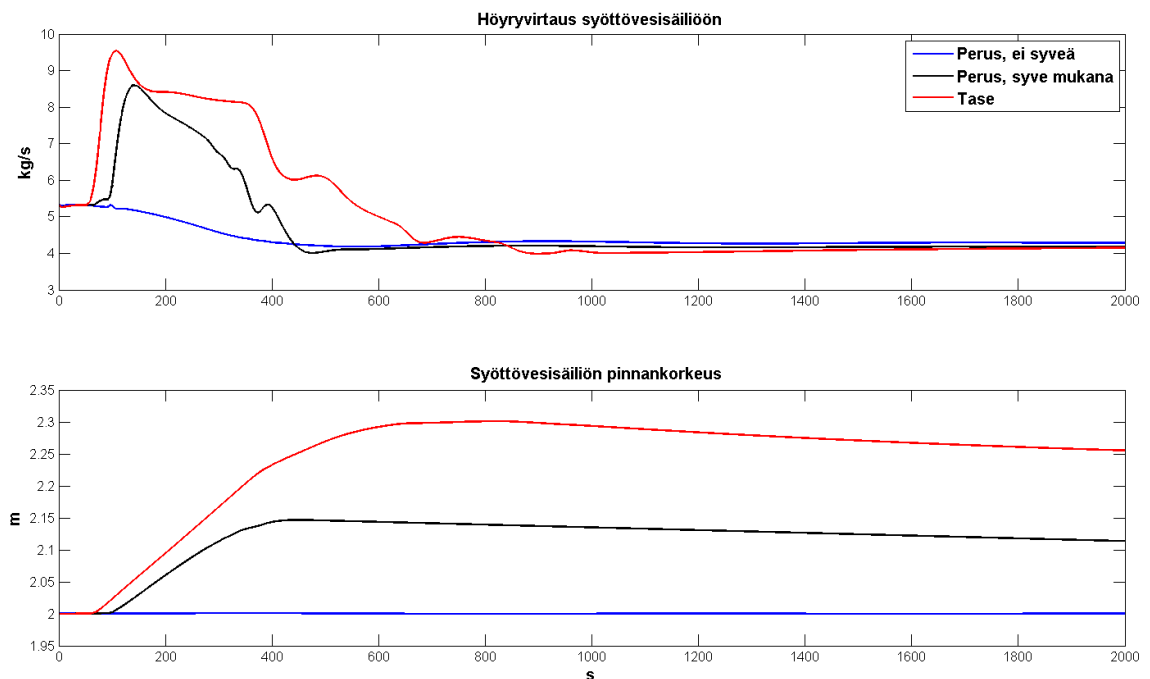
Ratakatko ei tässä esimerkissä suoraan vaikuta VP-höyryn kulutukseen. Höyryakkua ladattaessa sen kulutus kuitenkin kasvaa, jolloin väliottoventtiili aukeaa. Kulutuksen kasvu on niin suurta, ettei väliottoventtiilillä saada siirrettyä höyryä tarpeeksi VP-tukkiin. Lisäksi laskeneen MP-höyryn kulutuksen vuoksi säätöventtiiliä on kuristettu ja tämä pienentää myös väliottovirtausta. Tästä johtuen joudutaan käyttämään KP/VP-reduktiota kuvan 23 mukaisesti riittävän VP-höyryn turvaamiseksi. Tällöin VP-paine putoaa reduktiolle aseteltuun alarajaan (11,5 bar). KP/VP-reduktion läpi kulkeva höyry ohittaa turbiinin kokonaan, eikä siitä näin ollen saada yhtään sähköä. Tämä on kuitenkin yleensä taloudellisempi ratkaisu, kuin höyryn ohjaaminen turbiinin läpi MP-tukkiin ja sieltä apulauhduttimeen. Taseratkaisun VP-paineessa esiintyy pieni häiriö höyryakun lataamisen päättyessä, jolloin reduktion käyttötarve hetkellisesti häviää ja paine hieman nousee. Paineen muutos on kuitenkin merkityksettömän pieni. Höyryverkon asettuessa uuteen tasapainoon, ei VP-paine palaudu takaisin asetusarvoonsa. Vähentyneestä turbiinin virtauksesta johtuen väliottoventtiilin kapasiteetti ei ole riittävä vastaamaan VP-höyryn kulutusta ja osa siitä joudutaan ohjaamaan KP/VP-reduktion kautta vaikkei höyryakkua enää ladata. VP-tukin paineissa ja ohjauksissa ei esiinny merkittäviä eroja eri menetelmien välillä. Taseratkaisussa muutokset ovat hieman muita tasaisempia. Todel-

lisuudessa yleensä myös VP-höyryn kulutus putoaa ratakatkon yhteydessä, jolloin KP/VP-reduktioon ei jouduta turvautumaan yhtä voimakkaasti. Tässä esimerkissä yksinkertaisuuden vuoksi sen kulutus oletettiin vakioksi.

6.1.2 Tasauskomponenttien käyttö ratakatkossa

Tasauskomponenttien käytössä syöttövesisäiliön hyödyntämisellä on merkittävä vaikutus muiden komponenttien käyttötarpeeseen höyrykuorman pudotessa. Muutettavan lisävesivirtauksen avulla syöttövesisäiliön lämmitykseen käytettävän höyryn massavirtaa voidaan kasvattaa väliaikaisesti. Tämä vähentää puolestaan höyryakun, apulauhdutuksen ja ulospuhalluksen käytön tarvetta. Kyseisten komponenttien käyttö aiheuttaa aina ylimääräisiä tuotantokustannuksia. Akkua ladattaessa ohitetaan ainakin osa turbiinista ja menetetään sähkötehoa, apulauhdutuksessa menetetään höyryn sisältämä lämpöenergia ja ulospuhalluksessa menetetään lämpöenergian lisäksi lauhde. Syöttövesisäiliön käytöstä tasauksessa on siis oletusarvoisesti selkeästi hyötyä höyryverkon hallinnassa kunhan säiliön pinnankorkeus pidetään sallituissa rajoissa.

Kuvasta 24 nähdään, että syöttövesisäiliön käytöllä voidaan taseratkaisussa pienentää väliaikaisesti muiden komponenttien tasauskuormaa noin 3 kg/s, jolloin myös kokonaistasauskapasiteetti kasvaa yhtä paljon. Syöttövesisäiliön käytöllä painerajoihin perustuvassa ratkaisussa vastaava luku on noin 2 kg/s. Kyseisessä ratkaisussa syöttövesisäiliön käytön tehokkuus riippuu sen säätimen virityksestä. Viritysparametrit on asetettava toimimaan rauhallisesti, koska muuten pienen häiriön tapauksessa syntyy helposti värähtelyä lisävesivirtaukseen. Tällaista pienempää häiriötä simuloidaan luvussa 6.3.



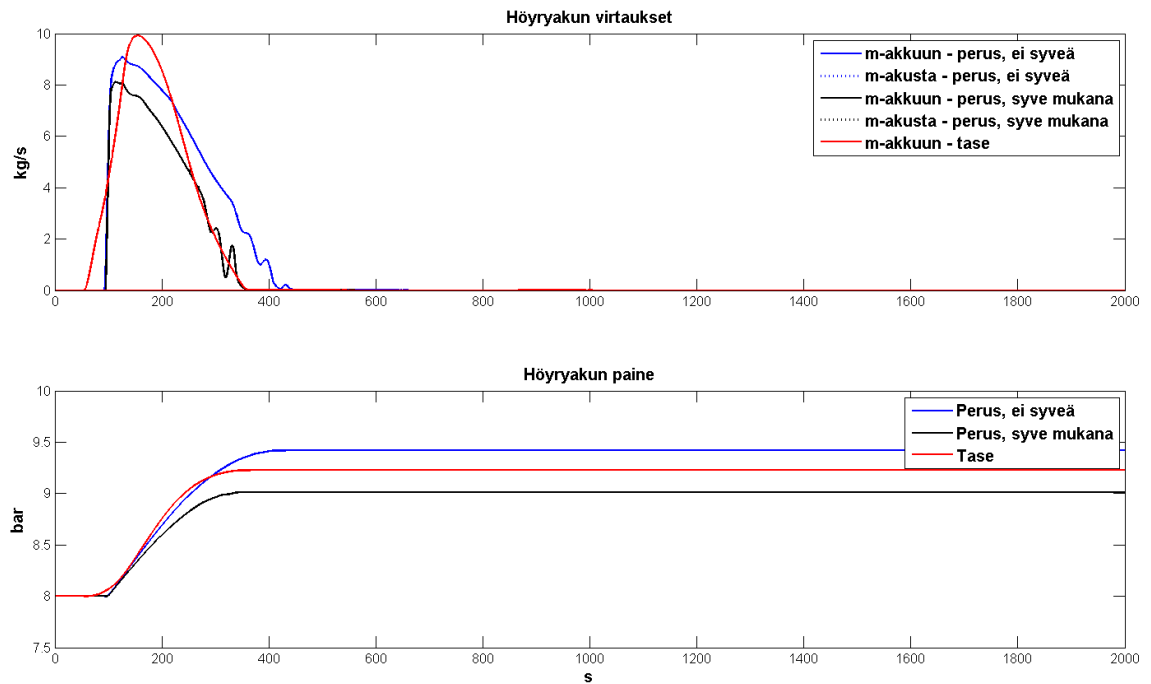
Kuva 24: Syöttövesisäiliön käyttö ratakatkon yhteydessä.

Syy syöttövesisäiliön aiheuttamaan värähtelyyn on se, ettei MP-painerajan mukaan ohjata suoraan höyryvirtausta vaan lisävesivirtausta. Lisävesivirtauksen kasvattaminen viilentää säiliötä ja paine putoaa, jolloin painesäädin reagoi tähän kasvattamalla sisään otettavaa höyryvirtausta. Höyryvirtauksen muutokset ovat lisävesivirtausta hitaampia syöttövesisäiliön suuruudesta ja täten hitaasta dynamiikasta johtuen. Jos tasaustarve on suurempi kuin säiliön tasaukaskapasiteetti ei värähtelyä synny, koska lisävesiohjaus satu-roituu ääriarvoonsa.

Simulointien mukaan suurimman tasaustarpeen aikana säiliön pinnankorkeus ei ehdi nousta niin paljoa, että tasausta olisi rajoitettava kummassakaan syöttövesisäiliötä hyödyntävässä ratkaisussa. Noin 450 s kohdalla tasaustarve alkaa hiljalleen häviämään pienentyneestä kattilan tehosta johtuen, jolloin pinnankorkeuden säädin pääsee hiljalleen korjaamaan pintaa takaisin asetusarvoonsa. Tämän takia ratkaisussa, jossa syöttövesisäiliötä ei käytetä tasaukseen on syöttövesisäiliön höyryvirtaus häiriön kompensoinnin jälkeen hieman muita suurempi. Kaikissa ratkaisuissa simuloinnin lopussa syöttövesisäiliön höyrynkulutus on pienempää kuin alussa pienentyneestä kattilan kuormasta johtuen.

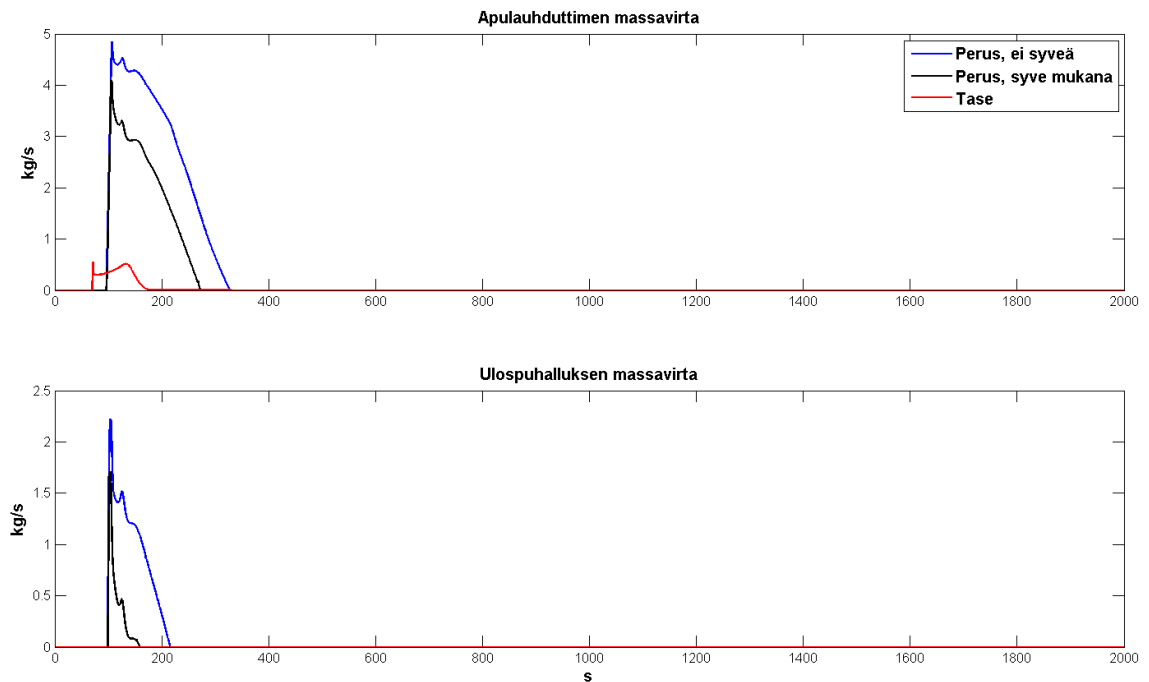
Höyryakun käyttö ratakatkon yhteydessä on esitetty kuvassa 25. Syöttövesisäiliön lisääminen perinteiseen ratkaisuun pienentää höyryakkuun menevää massavirtaa, sillä nostettu akun käytön paineraja pienentää virtaussäätimelle tulevaa erosuuretta. Akun virtaussäädöt on viritetty tässä ratkaisussa hieman nopeammaksi, jotta akun käyttö säilyy tehokkaana pienemmästä virtaussäätimen erosuureesta huolimatta. Ratkaisussa, jossa syöttövesisäiliötä ei käytetä tasaukseen ja samoin taseratkaisussa höyryakun ottama höyryvirtaus on suurempi ja akkua ladataan enemmän kuten kuvasta 25 nähdään. Taseratkaisussa höyryakkua aletaan lataamaan huomattavasti aiemmin kuin painerajoihin perustuvissa ratkaisuissa, koska kaikki syöttövesisäiliöltä yli jäävä tasaustarve ohjataan akulle välittömästi.

Perusratkaisussa höyryakun käyttö on taseratkaisua hitaampaa. Perusratkaisujen akun lataus- ja purkausnopeuksia voitaisiin kuitenkin kasvattaa lisäämällä säätimen vahvistusta, mutta tässä on haittansa. Nopeat ohjaukset aiheuttavat yliohehjuuksia, jotka kuluttavat toimilaitteita. Yliohehjuukset näkyvät myös häiriöinä verkon paineissa. Lisäksi höyryakun tapauksessa perusratkaisussa liian suurilla massavirroilla akku täyttyy liian nopeasti. Akun täyttyminen ja sen aiheuttama höyryn kulutuksen pienentyminen näkyy häiriönä MP-paineessa ja korjaantuu vasta, kun apulauhdutin ehtii reagoimaan kasvaneeseen paineeseen. Tämän takia perusratkaisussa höyryakkua ei voida virittää tämän nopeammaksi. Taseratkaisussa ohjaukset ovat ennalta laskettuja ja tasaisia ohjausten suodattamisen vuoksi. Näin myös höyryvirtaukset ovat tasaisia ja täten höyryverkon paineet eivät värähtelee tarpeettomasti. Tällöin höyryakun täyttyessä taselaskenta alkaa automaattisesti lisäämään ohjausta apulauhduttimelle siten, että höyryn kokonaiskulutus pysyy tasaisena eivätkä paineet heilahtele. Tässä esimerkissä höyryakku ei kuitenkaan ehdi täysin täyttyä, eikä kyseistä toimenpidettä jouduta tekemään. Taseratkaisun tasaiset ohjaukset ovat selkeä etu myös toimilaitteiden eliniän kannalta.



Kuva 25: Höryrakun käyttö ratakatkon yhteydessä.

Kuvassa 26 on esitetty apulauhduttimen ja ulospuhalluksen käyttöä ratakatkossa. Perinteisissä ratkaisuissa tasauskomponenttien ohjauksen voimakkuudet perustuvat paineroihin, joten MP-paine pääsee aluksi nousemaan. Tällöin joudutaan käyttämään apulauhdutusta ja ulospuhallusta. Ulospuhallustarve poistuu kuitenkin hyvin nopeasti. Apulauhdutusta sen sijaan joudutaan jatkamaan hyvin pitkään, koska akkua ja syöttövesisäiliötä ei rauhallisista virityksistä johtuen voida käyttää maksimaalisen tehokkaasti. Tase-ratkaisussa ulospuhallusta ei tarvita ollenkaan ja apulauhduttimenkin käyttö jää vähäiseksi maksimaalisesta syöttövesisäiliön ja höryrakun käytöstä johtuen.



Kuva 26: Apulauhduttimeen ja ulospuhallukseen menevät höyryn massavirrat.

Taulukossa 6 on esitetty apulauhdutuksessa ja ulospuhalluksessa menetetyn höyryn energia, tuotettu sähköenergia sekä käytetty polttoaineen energia kullekin ratkaisulle. Taseratkaisussa hukattu höyry määrä on selvästi pienin suurimmasta syöttövesisäiliön ja akun käytöstä johtuen. Apulauhdutuksen ja ulospuhalluksen käytön vähentyminen ei ole yhtä merkittävää pelkällä syöttövesisäiliön tasauksikäytön lisäämisellä perusratkaisuun. Perinteisessä ratkaisussa energiahäviöt ovat luonnollisesti suurimmat, koska syöttövesisäiliötä ei hyödynnetä tasauksessa. Apulauhdutuksen energiahäviöiden laskemisessa on käytetty MP-höyryn ja lauhteen entalpioiden erotusta. Ulospuhalluksessa on puolestaan käytetty MP-höyryn ja viileän lisäveden entalpioiden erotusta. Tulokset eivät siis huomioi ulospuhalluksessa menetetyn lauhteen kustannuksia.

Taulukko 6: Apulauhdutuksessa ja ulospuhalluksessa hukatut energiat sekä tuotetun sähköenergian ja käytetyn polttoainemäärän vertailu perus- ja taseratkaisuissa.

	Apulauhdutus	Ulospuhallus	Sähköenergia	Käytetty energia
Perus	0,42 MWh	0,08 MWh	25,75 MWh	116,41 MWh
Taseratkaisu	0,02 MWh	0 MWh	25,92 MWh	116,81 MWh
Perus – syve	0,24 MWh	0,02 MWh	25,79 MWh	116,34 MWh

Käytetyt polttoaineen energiat ovat lähellä toisiaan kaikissa ratkaisuissa, mutta kuten kuvasta 22 havaittiin, ovat kattilaan kohdistuvat rasitukset pienimmät taseratkaisussa eikä perinteisten ratkaisujen kaltaisia tehon yliohejuuksia tapahdu. Taseratkaisun rauhallisempi tehon pudotus näkyy muita ratkaisuja hieman suurempana polttoaineen kulutuksena. Myös tuotetun sähkötehon suhteen menetelmien väliset erot ovat hyvin pienet. Suurempi polttoaineen käyttö näkyy taseratkaisussa suurempana höyrytehona ja näin ollen myös tuotettu sähköteho on taseratkaisussa suurin. Syöttövesisäiliötä hyödyntävässä painerajaisessa ratkaisussa tuotettu sähköteho on puolestaan hieman perusratkaisua suurempaa pienemmästä energiankulutuksesta huolimatta, koska osa akun lataustarpeesta on kompensoitu syöttövesisäiliöllä. Tällöin ei menetetä sähkötehoa. Kokonaisuudessaan taseratkaisu on menetelmistä energiatehokkain suurimmasta polttoaineen kulutuksesta huolimatta. Tämä johtuu suurimmasta sähkötehon tuotosta ja pienimmästä hukkaenergian määrästä.

6.1.3 Yhteenveto ratakatkosta

Ratakatkon simulointitulosten perusteella kaikki toteutetut höyryverkon hallintamenetelmät pystyvät pitämään verkon paineet sellaisena, etteivät paineen vaihtelut aiheuta merkittäviä ongelmia muille käynnissä oleville paperikoneille. Taseratkaisu selviää tilanteesta kuitenkin selkeästi parhaiten. Simuloinnissa ei ole huomioitu muita mahdollisia samanaikaisia häiriöitä. Käytännössä häiriöt ovat usein myös suurempia ja nopeampia kuin tässä simuloinnissa. Tällöin on mahdollista, että perinteisten ratkaisujen tapauksessa paineiden hallinta ei enää toimi riittävän hyvin. Tulosten mukaan taseratkaisussa on mahdollista kompensoida myös huomattavasti suurempia häiriöitä ilman merkittävää paineiden nousua. Myös tasauskomponenttien käytön taloudellisesta näkökulmas-

ta taseratkaisu on selkeästi paras energiatehokkaasti jaetusta komponenttien tasauskäytöstä johtuen. Suuremmilla kuormanpudotuksilla menetelmien väliset taloudelliset erot pienenevät, koska tällöin kaikissa menetelmissä joudutaan lisäämään apulauhdutuksen ja ulospuhalluksen käyttöä.

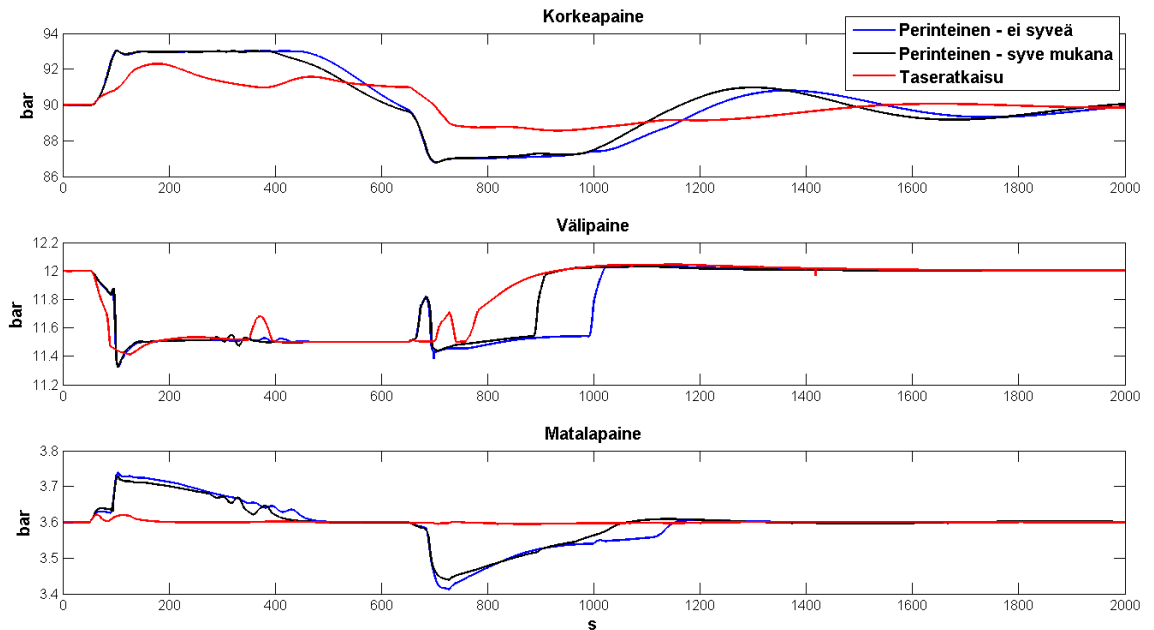
6.2 10 minuutin ratakatko

Lyhyt ratakatko, jonka jälkeen tuotanto palautuu alkuperäiselle tasolle on tyypillinen häiriö paperitehtaiden höyryverkoille. Yleensä tuotantokatkot kestävät ratakatkojen yhteydessä noin 10 minuuttia. Tämä aika on valittu katkon pituudeksi tässä simulointiesimerkissä. Ratakatkon alkaessa MP-höyryn kulutus putoaa ramppimaisesti aivan kuten luvussa 6.1. 10 minuutin katkon jälkeen eli hetkellä 650 s sama kulutusmuutos tapahtuu toiseen suuntaan. Tässä yhteydessä ei toisteta luvun 6.1 tuloksia vaan keskitytään kuorman palautumiseen ja sen jälkeisiin tapahtumiin. Tällä simulointiesimerkillä on kaikista tehokkainta tutkia kuormantasauksen tehokkuutta, sillä ratakatkossa höyryä ylituotetaan ja paperikoneen käynnistyessä höyrystä on pulaa kattilan pienentyneestä höyryntuotannosta johtuen. Tällöin ylimääräisen höyryn tehokkaalla väliaikaisella varastoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä paremman energiatehokkuuden ja stabiilimman höyryverkon vuoksi.

6.2.1 Verkon paineet ja niiden ohjaukset väliaikaisessa katkossa

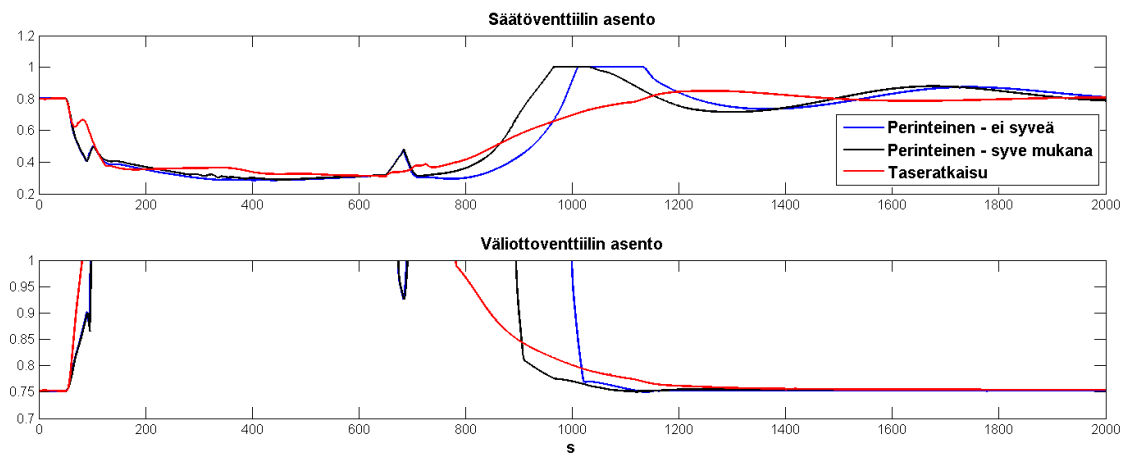
Höyryverkon paineiden käyttäytyminen eri menetelmillä 10 minuuttia kestävässä katkossa on esitetty kuvassa 27. Paperikoneen ylösajo aloitetaan hetkellä 650 s. Tällöin MP-höyryn kulutus alkaa kasvamaan nopeasti ja MP-painesäädin pyrkii kompensoimaan höyryn kulutuksen kasvua avaamalla säätöventtiiliä kuvan 28 mukaisesti, jolloin KP-paine putoaa. Taseratkaisussa kulutuksen kasvua kompensoidaan välittömästi säätöventtiilin ohjauksen lisäksi minimoimalla syöttövesisäiliön höyryvirtaus ja purkamalla höyryakkua, jolloin turbiinin säätöventtiiliä ei jouduta sulkemaan yhtä voimakkaasti kuin muissa ratkaisuissa. Tällöin paperikoneen ylösajo ei tulosten mukaan juurikaan näy MP-höyryn paineessa ja lisäksi muutokset KP-paineessa ovat muita ratkaisuja pienemmät.

Painerajoihin perustuvissa ratkaisuissa paperikoneen ylösajossa ensin KP-paine laskee alarajalleen, jolloin säätöventtiilin ohjausta on rajoitettava ja MP-paine alkaa putoamaan. Ylösajon alkaessa kummassakin perusratkaisussa KP-paine on jo valmiiksi laskussa pienentyneestä säätökattilan tehosta johtuen. Tämä entisestään nopeuttaa paineen putoamista ylösajon yhteydessä. Tällöin lieriön pintasäätö tai kattilan pääsäädöt voivat häiriintyä tai turbiiniin lämpötilagradientit voivat nousta liian suuriksi. Taseratkaisun rauhallisempi paineiden käyttäytyminen pienentää huomattavasti riskiä näiden ongelmien syntymiselle myös voimakkaamman häiriön tapauksessa. Rauhallisempi KP-paineen käyttäytyminen helpottaa myös kattilan kuormaa kuten kuvasta 29 nähdään. Simulointijakson aikainen säätökattilan pienimmän ja suurimman polttotehon välinen erotus on taseratkaisussa yli 20 MW pienempi kuin muissa ratkaisuissa, jolloin kattilaan

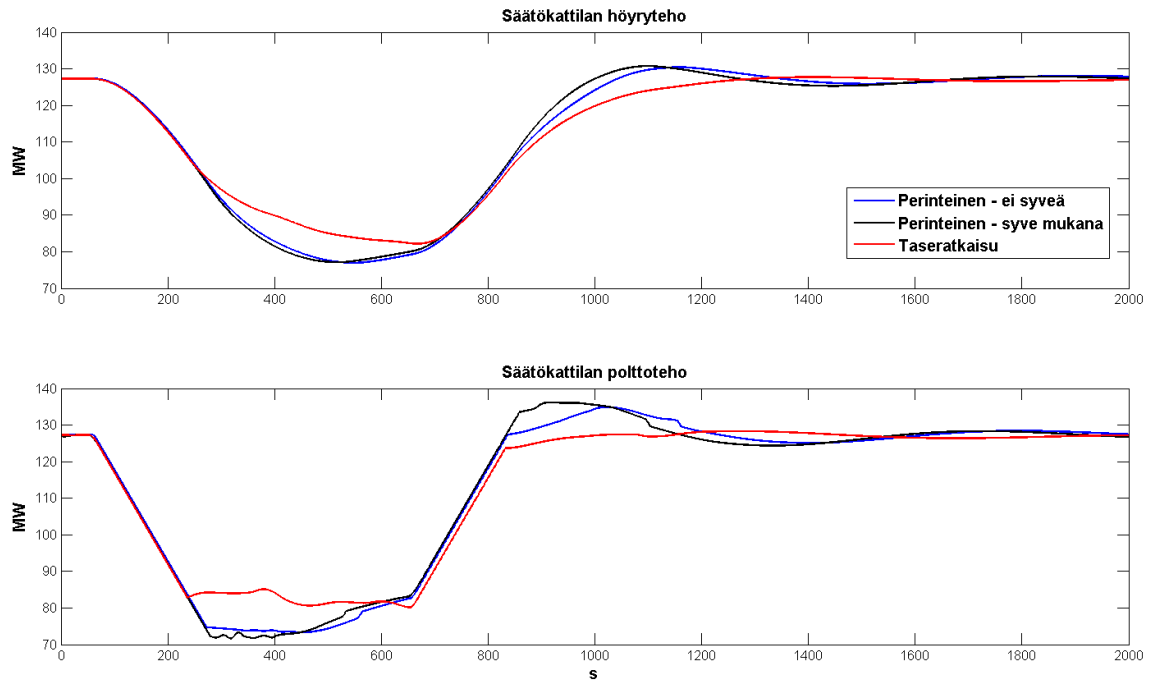


Kuva 27: Höyryverkon paineet väliaikaisessa tuotannon pudotuksessa.

kohdistuvat rasitukset pienenevät merkittävästi. Höyrytehdossa vastaava erotus on hie-
man yli 10 MW. Taseratkaisun hitaampi kattilan tehon pudotus on eduksi myös tilan-
teessa, jossa ratakatko on lyhyempi kuin tämän esimerkin 10 minuuttia. Tällöin höyry-
teho ei turhaan ehdi pudota liian alas. Lyhyempi ratakatko ei aiheuta ongelmia kuorman
tasauksessa perinteisillä ratkaisuillakaan, koska tällöin tuorehöyryn paine on korkealla
ja kattilaan on varastoitunut enemmän energiaa paperikoneen ylösajoa varten. Kattilaan
kohdistuvat rasitukset ovat kuitenkin tällöin taseratkaisua suuremmat.

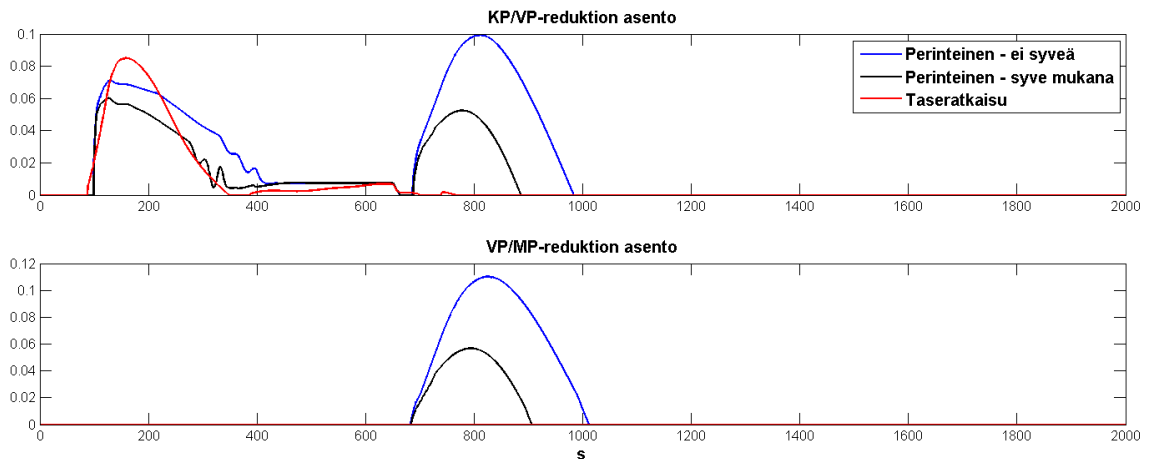


Kuva 28: Turbiinin säätöventtiili ja väliottoventtiili väliaikaisessa tuotannon pudotuk-
sessa.



Kuva 29: Säätökattilan höyry- ja polttotehot väliaiksessä tuotannon pudotuksessa.

Taseratkaisussa tasauskapasiteetin riittävyyden vuoksi MP-paine ei putoa paperikoneen ylösajossa. Kuvasta 30 havaitaan, että tällöin perinteisissä ratkaisuissa joudutaan hetkellisesti käyttämään sekä VP/MP- että KP/VP-reduktioita MP-paineen romahtamisen estämiseksi. Niiden käyttöä rajoittaa kuitenkin KP- ja VP-paineiden alarajat. Syöttövesisäiliön käytöllä pystytään pienentämään reduktioiden käyttöä merkittävästi. Sen käyttö myös hieman pienentää MP-paineen pudotusta. Taseratkaisussa VP/MP-reduktiota ei tarvita lainkaan tehokkaan höyryakun ja syöttövesisäiliön tasauskäytön vuoksi. Molemmista perinteisistä toteutuksista MP-paine ehtii pudota lähes 0,2 bar. Näin pienessä paineen muutoksessa höyryn ominaisentalpian pudotus on merkityksettömän pieni. Paineen putoaminen pienentää kuitenkin paperikoneelle menevää kuivaushöyryvirtausta ja kuivaustehoa pienentyneen venttiilin yli olevan paine-eron vuoksi. Tämä häiriö kompensoidaan avaamalla kuivaushöyryn säätöventtiiliä, jolla ohjataan paperiradan kuivaamiseen käytettävää höyryvirtausta. Mikäli paperikoneen ylösajo tehtäisiin nopeammin tai höyryn kulutusta nostettaisiin enemmän, olisi MP-paineen pudotus suurempi ja voisi ajaa kuivaushöyryn säätöventtiilin säätöalueen ulkopuolelle, jolloin kuivausteho heikkenee. MP-paineen ylläpidossa taseratkaisu toimii paremmin ja se pystyy pitämään MP-paineen asetusarvossaan niin kauan kuin häiriön voimakkuus ei ole verkon tasauskapasiteettia suurempi.



Kuva 30: KP/VP- ja VP/MP-reduktioit väliaikaisessa tuotannon pudotuksessa.

Paperikoneen ylösajon jälkeisen höyryn kulutuksen kasvun ja tästä johtuvan säätöventtiilin aukeamisen vuoksi väliottoventtiilin läpi kulkeva massavirta kasvaa eikä KP/VP-reduktiota enää tarvita missään säätöratkaisussa VP-höyryn tuottamiseen. Tämä nähdään kuvasta 30. Tällöin VP-paine nousee takaisin reduktion painerajasta (11,5 bar) asetusarvoonsa (12 bar). Käytetyistä menetelmistä taseratkaisu palauttaa VP-paineen takaisin asetusarvoonsa tasaisimmin ja myös nopeiten. Perusratkaisuissa muutos on askelmaisempi ja väliottoventtiilin ohjaukset ovat huomattavasti taseratkaisua rajumpia ja voivat aiheuttaa pieniä häiriöitä VP-höyryä käyttäville prosesseille.

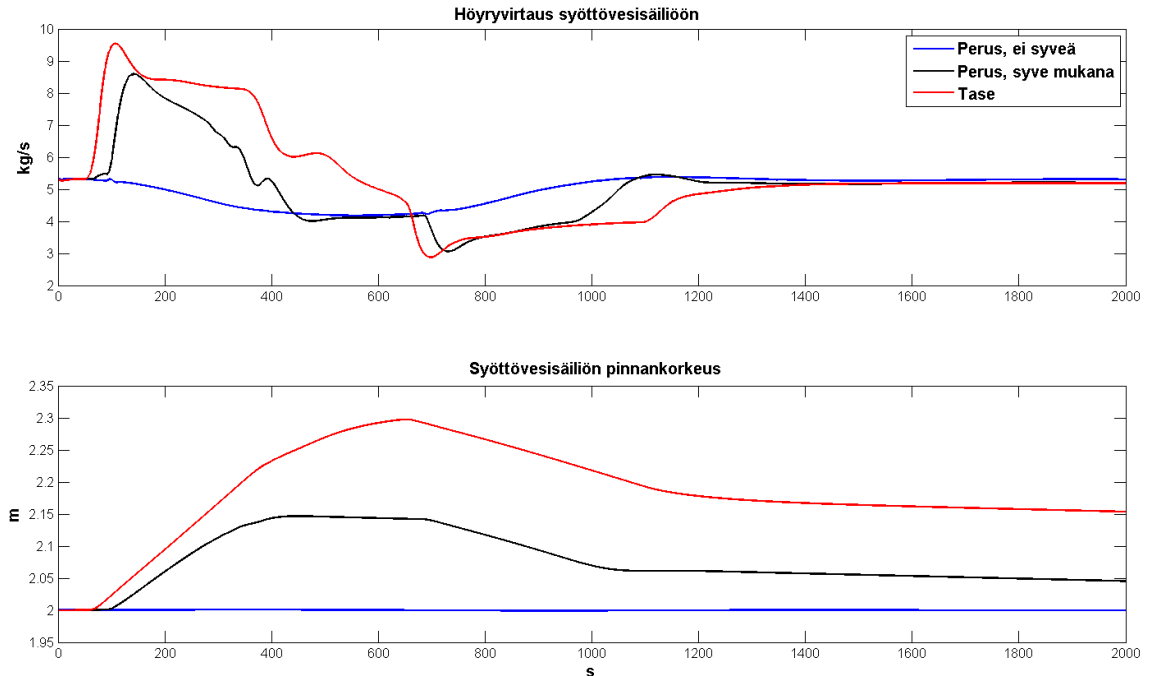
6.2.2 Tasauskomponenttien käyttö väliaikaisessa katkossa

Syöttövesisäiliön ja höyryakun toiminta väliaikaisessa katkossa on esitetty kuvissa 30 ja 31. Perusratkaisussa, jossa syöttövesisäiliötä ei käytetä kuorman tasauksessa toteutetaan kuormantasaus pelkällä höyryakulla, joka pyrkii estämään MP-tukin paineen putoamista alle 3,56 bar. Koska akkua ladattiin ratakatkon yhteydessä, riittää varastoitu höyry paperikoneen ylösajoon. MP-paine ehtii kuitenkin pudota lähes 0,2 bar ennen kuin akusta purettava höyryvirtaus kasvaa niin suureksi, että paine lähtee takaisin nousuun.

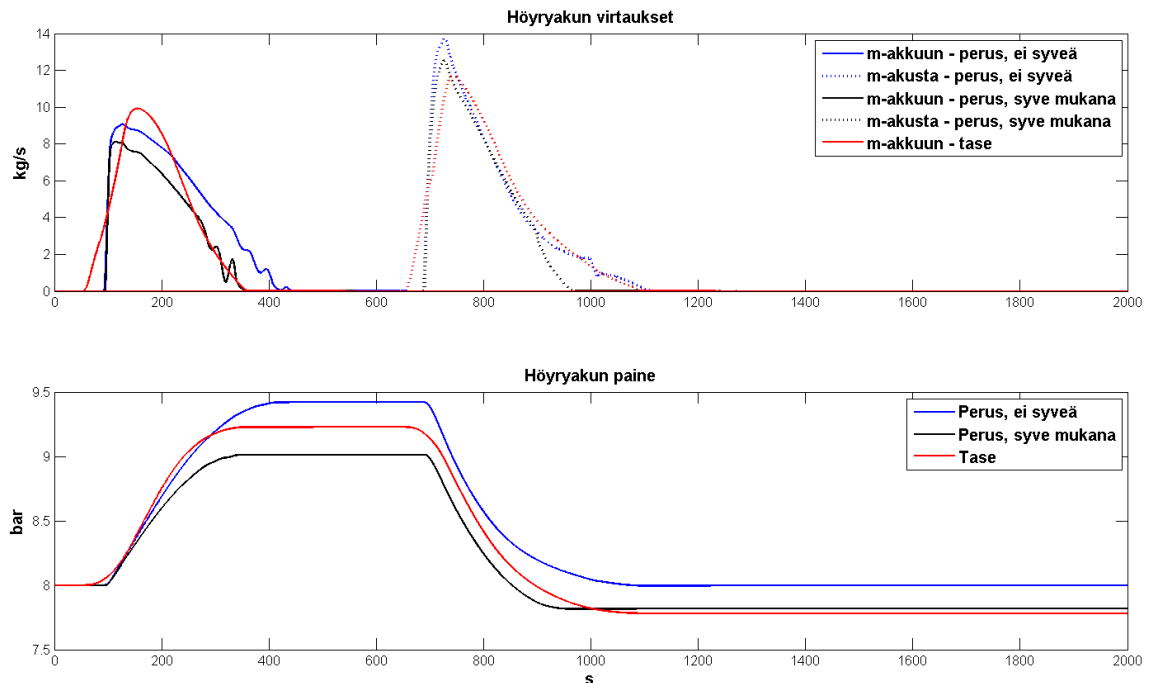
Lisäämällä perusratkaisuun syöttövesisäiliö, ei höyryakkua jouduta purkamaan ylösajossa yhtä voimakkaasti. Tällöin höyryä jää akkuun enemmän varastoon mahdollisten tulevien tuotantohäiriöiden varalle. Kuvista 30 ja 31 nähdään, että ylösajossa syöttövesisäiliön tasauskäytöllä voidaan pienentää höyryn kulutusta noin 1 kg/s. Muutos on sama sekä painerajoihin perustuvassa että tasepohjaisessa ratkaisussa. Tämän alemmas ei päästä, koska tällöin lisävesiventtiili on täysin kiinni eikä sen avulla voida enää pienentää höyryakkuun menevää höyryvirtausta. Kuvasta 30 havaitaan syöttövesisäiliön pinnankorkeuden laskevan hyvin hitaasti paperikoneen ylösajon yhteydessä, joten säiliön varastointikapasiteetti ei rajoita sen käyttöä ylösajossa.

Koska höyryakun ja syöttövesisäiliön tilavuudet määrittävät maksimaalisen tasauskapasiteetin, ei taseratkaisulla voida kapasiteettia tästä enää nostaa. Suurempi lähtötaso syöttövesisäiliön pinnankorkeudessa ja höyryakun paineessa mahdollistavat pidemmän kuormantasauksen. Tällöin kattilan ei ole pakko tehdä taseratkaisussa yhtä nopeita

kuormanmuutoksia kuin perusratkaisuissa. Taseratkaisussa tasaustarpeen laskennan ansiosta saadaan MP-höyryn paine pysymään haluttuna niin kauan kuin laskennallinen tasaustarve pystytään toteuttamaan tasauskomponenteilla. Värehtelyjä komponenttien ohjauksissa ei juurikaan esiinny millään käytetyistä menetelmistä, joten sen puolesta taselaskenta ei tuo tässä tapauksessa etua muihin menetelmiin nähden.



Kuva 31: Syöttövesisäiliön käyttö väliaikaisessa ratakatkossa eri menetelmillä.



Kuva 32: Höyryakun käyttö eri menetelmillä väliaikaisen ratakatkon yhteydessä.

Apulauhduttimen ja ulospuhalluksen käyttöä ei tässä yhteydessä esitetä, koska niiden käytölle ei ole tarvetta paperikoneen ylösajossa. Ratakatkon yhteydessä ulospuhalluksen ja apulauhdutuksen käyttö oli taseratkaisussa huomattavasti kahta muuta mene-

telmää pienempää, jolloin vastaavasti akkua ja syöttövesisäiliötä ladattiin enemmän. Paperikoneen ylösajossa tämä näkyy suurempana kapasiteettina väliaikaiseen höyryn tuotantoon. Myös syöttövesisäiliön lisäyksestä perusratkaisuun on selkeästi hyötyä, koska ratakatkon aikana säiliön pinnankorkeutta nostettiin. Täten ylösajon yhteydessä syöttövesisäiliön lisävesivirtaus on mahdollista sulkea kokonaan pidemmäksi aikaa.

Simuloinnin aikana tuotettu sähköenergia ja käytetty polttoaineen energia on esitetty taulukossa 7. Taulukon tulosten mukaan tuotetun sähkön ja käytetyn polttoaineen määrissä ei menetelmien välillä ole suuria eroja. Kuvista 30 ja 31 kuitenkin nähtiin, että taseratkaisussa simuloinnin lopussa höyryakkuun ja syöttövesisäiliöön on varastoitu- neena enemmän energiaa kuin muissa ratkaisuissa. Perinteisessä ratkaisussa energian varastointi on puolestaan pienintä. Ottaen tämä huomioon, voidaan todeta taseratkaisun olevan menetelmistä energiataloudellisesti tehokkain väliaikaisen tuotantokatkon yhteydessä. Tämän lisäksi taseratkaisussa sähköntuotannon hyötysuhde on menetelmistä paras. Syöttövesisäiliötä käyttävässä perusratkaisussa sähköntuotannon hyötysuhde on lähes yhtä hyvä, mutta ilman syöttövesisäiliötä se putoaa selvästi suuremman akun käytön ja tästä johtuvan turbiinin ohituksen vuoksi.

Taulukko 7: *Apulauhdutukseen ja ulospuhallukseen menevien massojen sekä tuotetun sähköenergian ja käytetyn polttoainemäärän vertailu perus- ja taseratkaisuihin.*

	Sähköenergia	Lämpöenergia	Sähköntuotannon hyötysuhde
Perus	29,71 MWh	132,41 MWh	21,7 %
Taseratkaisu	30,23 MWh	132,62 MWh	22,8 %
Perus - syve	30,07 MWh	132,37 MWh	22,7 %

6.2.3 Yhteenveto väliaikaisesta katkosta

Tasekonseptia käytettäessä ratakatko ja sen jälkeinen ylösajo ei juurikaan muuta MP-tukin painetta. KP-paine puolestaan elää jonkin verran, mutta siinäkin ei esiinny nopeita muutoksia eikä se näin ollen aiheuta häiriöitä muuhun prosessiin. Perinteisissä ratkaisuihin muutokset KP-paineessa ovat suurempia ja paperikoneen ylösajon jälkeen paineessa esiintyy värähtelyä ennen kuin se palautuu takaisin alkuperäiseen arvoonsa. Perinteisissä ratkaisuihin MP-paineen erosuure kasvaa suuremmaksi ylösajossa kuin alasajossa. Simuloitua häiriötä suuremmat häiriöt voivat heiluttaa MP-painetta perinteisillä menetelmillä liikaa etenkin silloin, kun syöttövesisäiliötä ei käytetä tasaukseen. Tällöin taseratkaisu toimii paremmin katkon yhteydessä tapahtuneesta tehokkaammasta höyryn varastoinnista ja ennakoinnista johtuen. Taseratkaisussa MP-paine pysyy kutakuinkin asetusarvossaan niin kauan kuin laskennallinen tasaustarve pystytään tuottamaan tasauskomponenteilla. Paperikoneen ylösajon yhteydessä tasauskomponenttien käyttö on kaikilla menetelmillä hyvin samanlaista. Syöttövesisäiliön käytöllä ei ole kulutuksen noustessa yhtä suurta merkitystä kuin sen laskiessa, koska lisävesivirtaus on melko pieni normaalissa ajossa. Tämän vuoksi syöttövesisäiliön höyryvirtausta ei voida merkittävästi pienentää normaalissa ajossa. Energiatohokkuuden puolesta taseratkaisu

on muita menetelmiä parempi lähinnä alasajon yhteydessä varastoidusta suuremmasta höyrymäärästä johtuen.

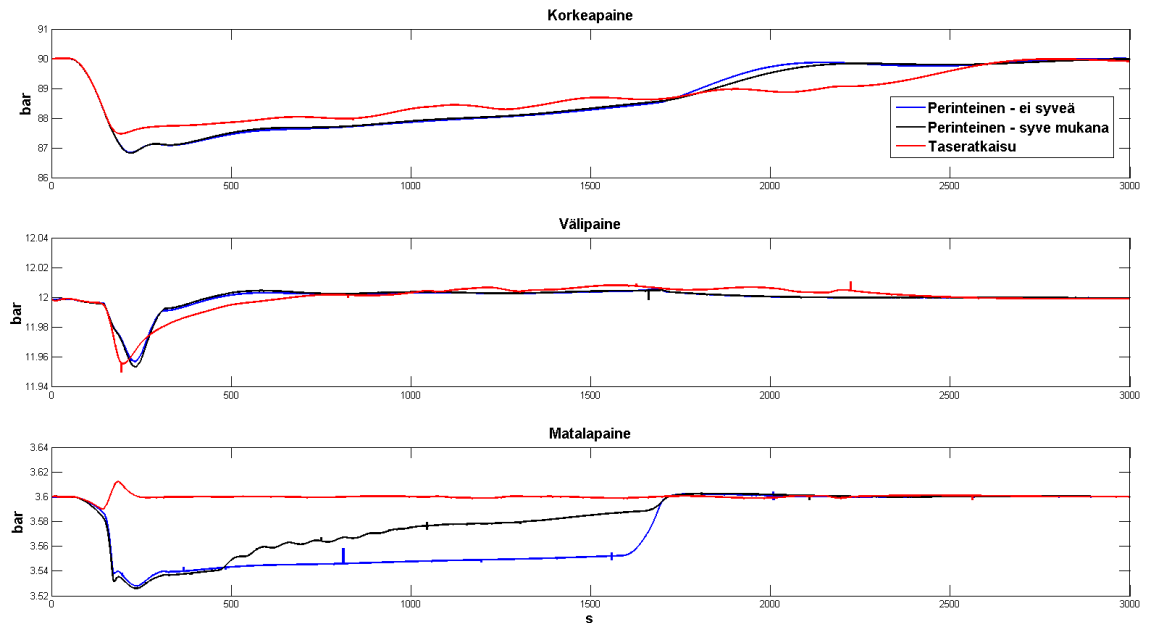
6.3 Polttoaineen lämpöarvon heikkeneminen

Säätökattilan polttoaineen lämpöarvon vaihtelu on hyvin yleistä ja se vaikuttaa suoraan kattilan tuottamaan höyrytehoon. Pienentynyt lämpöarvo pystytään kompensoidaan hitaasti kattilan tulitehoa kasvattamalla. Lämpöarvon muuttuminen ilmenee vasta KP-paineen muuttuessa, joten kyseisen häiriön vaikutuksia ei voi ennakoida höyryverkon taseratkaisun avulla. Tällöin tasekomponenttien ohjaus saadaan KP-paineen myötäkytkennästä. KP-paineen muutaman prosentin heittely ei häiritse prosessin toimintaa, joten pienet paineen muutokset eivät ole ongelma. Simuloinnin tarkoitus on varmistua taseratkaisun luotettavuudesta myös tilanteessa, jossa taselaskenta ei ohjaa tasauskomponenttien toimintaa vaan ohjaus tulee verkon paineiden myötäkytkennästä.

Tässä luvussa simuloidaan 3000 s tilannetta, jossa polttoaineen lämpöarvo heikkenee 50 s kohdalla askelmaisesti 10 %. Todellisissa kehittyneissä kattilasäädöissä polttoaineen lämpöarvon kompensointi nopeuttaa säätöä simulointijakson loppupuolella. Lämpöarvon laskentaa ei ole toteutettu tässä diplomityössä, joten tasapainotilan saavuttaminen on todellista hitaampaa.

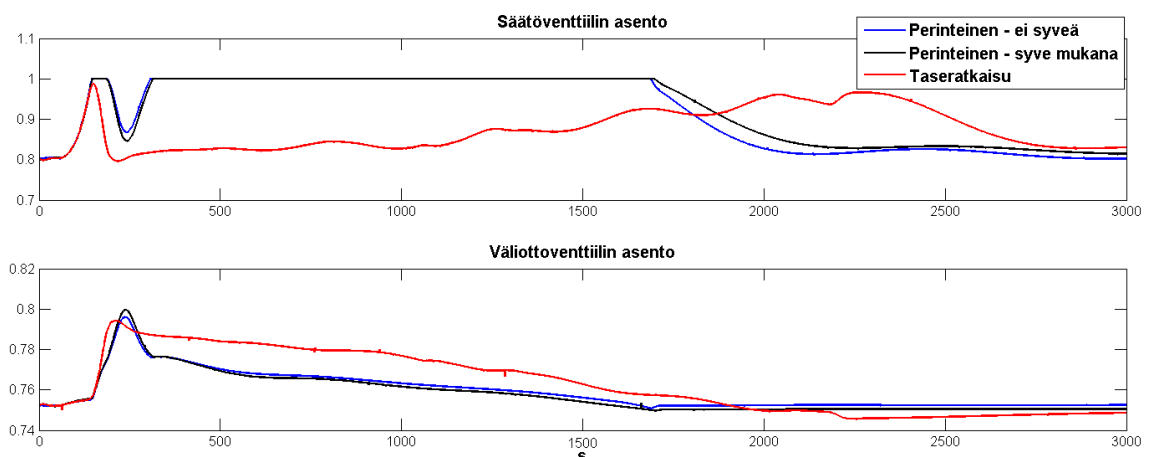
6.3.1 Verkon paineet ja niiden ohjaukset lämpöarvon heikentyessä

Höyryverkon paineet lämpöarvon heikentyessä on esitetty kuvassa 33. Lämpöarvon putoamisen vuoksi ensimmäisenä alkaa laskemaan KP-paine, jolloin VP- ja MP-tukkien painesäätimet pyrkivät pitämään paineet asetusarvoissaan avaamalla turbiinin venttiileitä. Nämä ohjaukset on esitetty kuvassa 34. Painerajoihin perustuvissa ratkaisuissa KP-tukin paineen lasku alkaa rajoittamaan säätöventtiilin toimintaa, jolloin MP-paine laskee alarajalleen ja joudutaan turvautumaan tasauskomponenttien käyttöön. Taseratkaisussa tasauskomponenttien ohjaus tulee laskeneesta KP-paineesta, joten tasaus ja täten myös KP-paineen laskun pysähtyminen tapahtuvat aiemmin. Kuvasta 33 nähdään taseratkaisun KP-paineessa esiintyvän pientä värähtelyä. Värähtely johtuu tasauskomponenttien käytön ja kattilan tehosäädön vaikutuksesta toisiinsa. Tasauskomponenttien nostaessa painetta kattilan tulitehon PI-säätimen ohjaus pienenee samanaikaisesti pienentyneen säätimen erosuureen vuoksi. Tämä johtuu pitkästä integrointiajasta, jolloin lyhyellä aikavälillä P-osa vastaa ohjausmuutoksista. Kattilan tulitehon säädön toteutuksessa (luku 5.1.1) värähtelyn syntyminen on pyritty minimoimaan. Simulointitulosten mukaan värähtelyn amplitudi on melko pieni ja jaksonaika pitkä, joten sen vaikutus on merkityksellisen prosessin kannalta.



Kuva 33: Höyryverkon KP-, VP- ja MP-paineet lämpöarvon heikentyessä.

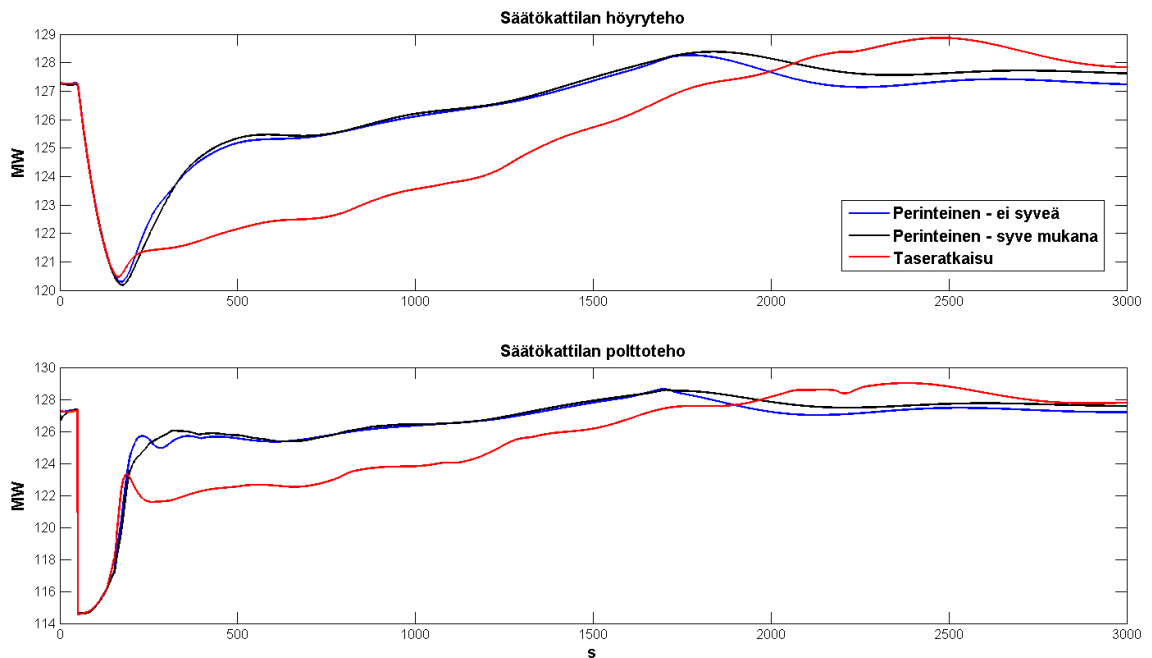
Välipainetukin paine pysyy käytännössä vakiona kaikissa menetelmissä koko simuloinnin ajan. Kaikissa ratkaisuihin VP-paine putoaa hetkellisesti hieman samalla kun KP-paine laskee, jolloin vastaavasti väliottoventtiili aukeaa ja nostaa VP-paineen takaisin asetusarvoonsa. Lisäksi perinteisissä ratkaisuihin turbiinin säätöventtiili sulkeutuu alhaisesta KP-paineesta johtuen. Taseratkaisussa alhainen KP-paine ei rajoita säätöventtiilin ohjausta. Tasauskomponenttien käyttö kuitenkin vähentää tarvetta turbiinista otettavalle MP-höyrylle, jolloin säätöventtiili sulkeutuu lähelle alkuarvoaan ja turbiinin läpi menevä virtaus pienenee. Simuloinnin edetessä säätöventtiili aukeaa hitaasti tasauskomponenttien höyrynkulutuksen pienentyessä. Reduktioventtiileitä ei tässä simuloinnissa tarvittu millään tutkituista menetelmistä.



Kuva 34: Turbiinin säätöventtiili ja väliottoventtiili lämpöarvon pudotessa.

Taseratkaisussa KP-paine ei laske säätöventtiilille asetetulle alarajalle asti. Tämän vuoksi MP-paine pysyy asetusarvonsa läheisyydessä koko simuloinnin ajan. Perinteis-

sessä ratkaisussa MP-paine ei juurikaan putoa höyryakulle asetetun MP-alarajan (3,55 bar) alapuolelle. MP-paine pysyy kutakuinkin vakiona niin kauan, kunnes kattilan höyryteho nousee vastaamaan kulutusta. Syöttövesisäiliön tasauskäyttö muuttaa tilannetta siten, että aluksi MP-paine pysyy akulle asetetussa raja-arvossa (3,54 bar). Kun kattilan höyryteho on noussut niin paljon, että syöttövesisäiliö pystyy kompensoimaan häiriön lähtee paine hitaasti nousemaan kohti asetusarvoaan. Kattilan tehot on esitetty kuvassa 35. MP-paine nousee samalla, kun kattilan teho nousee ja syöttövesisäiliön tasauskäyttö pienenee. Kummankin painerajoihin perustuvan ratkaisun suurin haitta paineiden puolesta on nopea MP-paineen pudotus simuloinnin alkupuolella. Pudotus olisi hitaampi, jos painerajat perustuisivat KP-paineeseen. Tämä ei kuitenkaan ole sen parempi ratkaisu, koska kuten luvussa 5 todettiin, aiheuttaa tasauskomponenttien KP-paineeseen perustuva käyttö helposti värähtelyä verkon paineisiin. Näin pienen häiriön tapauksessa pudotus MP-paineessa ei ole kuitenkaan merkityksellinen prosessin kannalta.

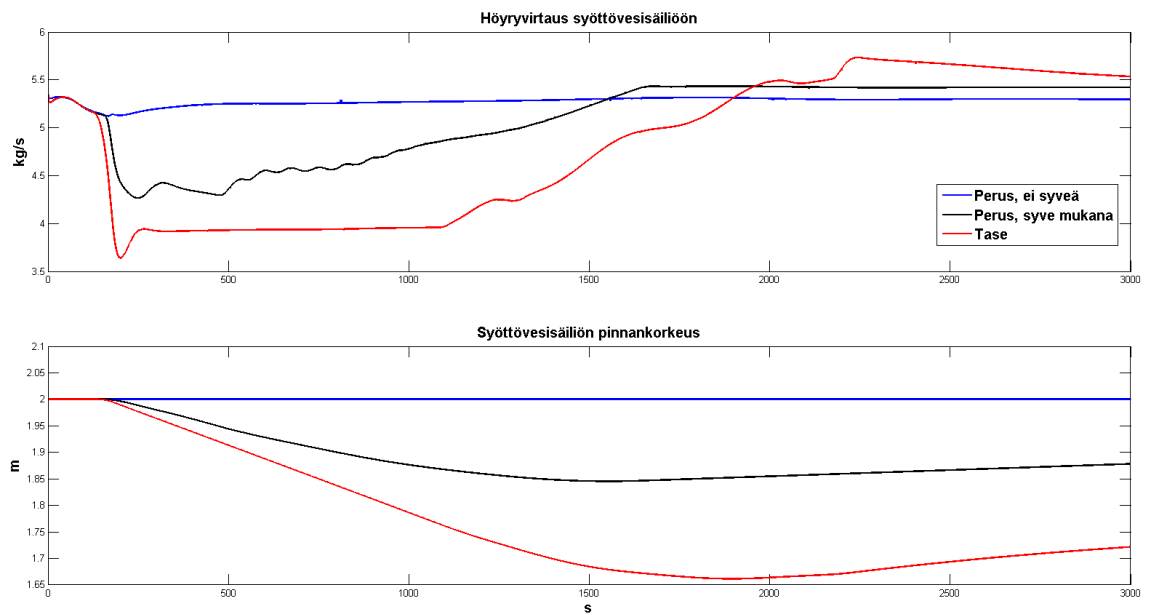


Kuva 35: Säätökattilan höyry- ja polttotehot lämpöarvon pudotessa.

Kaikilla menetelmillä verkon paineet pysyvät hyvin hallinnassa eikä tässä simulointiesimerkissä lämpöarvon heikkeneminen pääse aiheuttamaan merkittäviä häiriöitä höyryä käyttäville paperikoneille. Voimakkaamman häiriön kuten esimerkiksi polttoainelinjan tukkeutumisen tapauksessa syöttövesisäiliön käytöllä voidaan kasvattaa tasauskapasiteettia ja verkon häiriönsietokykyä. Taselaskennan ohjaus on sellainen, että KP- ja MP-paineiden karatessa kauas asetusarvoistaan voimistuu tasaus merkittävästi. Täten menetelmä pyrkii pitämään paineet aina kohtuullisen lähellä asetusarvojaan. On kuitenkin muistettava, että höyryntuotannossa tapahtuvassa suuressa häiriössä menetelmästä riippumatta syöttövesisäiliön ja höyryakun tilavuudet määrittelevät höyryverkon suurimman mahdollisen kuormantasauskäyvyn.

6.3.2 Tasauskomponentit lämpöarvon heikentyessä

Lämpöarvon putoamisesta johtuvassa höyrytehon laskussa ainoat mahdolliset tasauskomponentit ovat syöttövesisäiliö ja höyryakku. Perusratkaisussa tasauskomponenteista käytetään siis pelkästään höyryakkua ylläpitämään MP-tuikin painetasoa. Tämän vuoksi syöttövesisäiliön höyryvirtaus on kyseisessä ratkaisussa kutakuinkin vakio kuten kuvasta 36 nähdään. Taseratkaisussa syöttövesisäiliöön menevä höyryvirtaus minimoidaan hyvin nopeasti KP-paineen laskiessa. Painerajoihin perustuvassa syöttövesisäiliön käytössä säiliön täyttä tasauskapasiteettia ei päästä hyödyntämään rauhallisista säätimen virityksistä johtuen. Lisävesivirtausta ohjataan MP-paineen mukaan ja lisävesivirtaus puolestaan ohjaa välillisesti säiliön höyryvirtausta kuten edellisissä luvuissa todettiin. Tästä johtuen lisävesivirtauksen ohjaus ei saa olla lisävesivirtauksen ja höyryvirtauksen välistä dynamiikkaa nopeampi ja täten lisävesivirtauksen säätö on viritettävä rauhalliseksi. Nopeampi viritys saisi lisävesivirtauksen värähtelemään hyvin voimakkaasti. Havainnollistamissyistä syöttövesisäiliön lisäveden ohjaus on viritetty jopa hieman liian nopeaksi paineperustaisessa ratkaisussa. Tämä nähdään kuvan 36 höyryvirran ja kuvan 33 MP-paineen värähtelyistä kyseisellä menetelmällä. Taseratkaisussa ilmenevä värähtely höyryvirrassa johtuu värähtelevästä KP-paineesta. Tämä värähtely tapahtuu kuitenkin hyvin alhaisella taajuudella eikä täten rasita toimilaitteita.

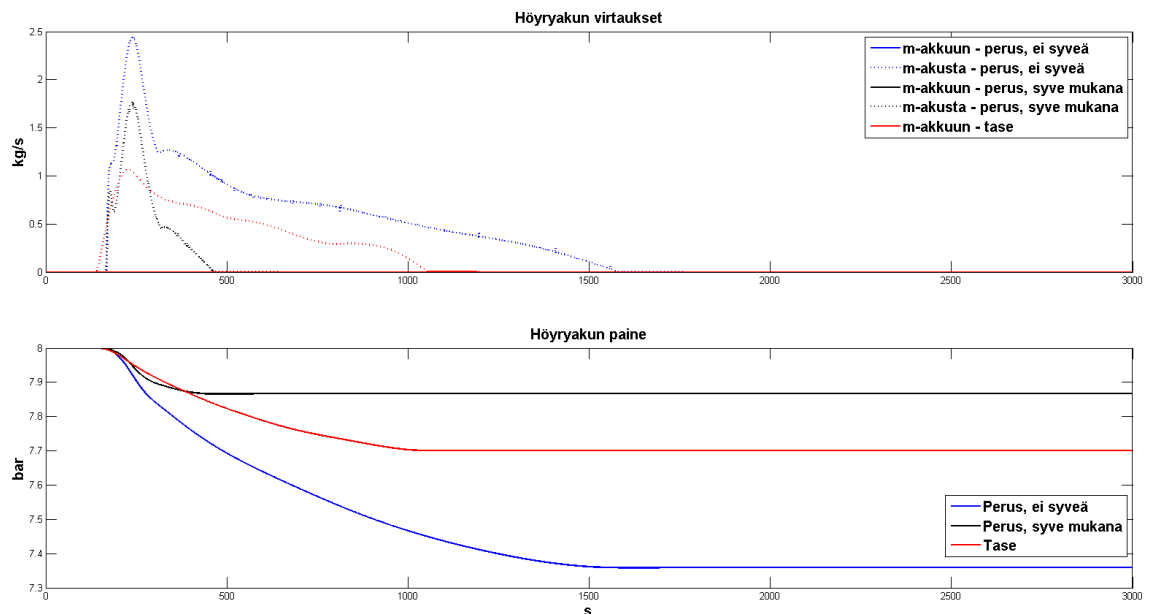


Kuva 36: Syöttövesisäiliön käyttö eri menetelmissä lämpöarvon pienentyessä.

Kuvassa 37 on esitetty höyryakun toiminta lämpöarvon heikentyessä. Perusratkaisussa akkua joudutaan purkamaan kaikista voimakkaimmin, koska syöttövesisäiliötä ei käytetä sen apuna. Vaikka taseratkaisussa syöttövesisäiliön tasauskäyttö on suurinta, on myös akun käyttö suurempaa kuin painerajaisessa syöttövesisäiliötä hyödyntävässä ratkaisussa. Tämä johtuu kattilan hitaammasta tehon muutoksesta, jolloin myös tasaustarve on suurempaa ja kestää pisimpään. Tämä ei kuitenkaan tarkoita taseratkaisun toimivan

muita menetelmiä huonommin, sillä voimakkaammissa häiriöissä myös säätökattilan tehonmuutokset ovat voimakkaampia. Tällä ratkaisulla pidetään huoli siitä, että tasauskapasiteetti riittää häiriön kompensointiin. Tämän lisäksi on huomioitava, että oikeasti kehittyneissä kattilasäädöissä korjataan polttoaineen laskennallinen lämpöarvo pitkällä aikavälillä takaisin oikeaksi, jolloin myös kattilan teho korjautuu nopeammin takaisin halutuksi.

Apulauhdutuksen ja ulospuhalluksen käytölle ei ole tarvetta lämpöarvon heikentyessä, koska verkon painetasoja pyritään ylläpitämään eikä laskemaan. Käytetyn polttoaineen ja saadun sähköenergian tarkastelu ei ole merkityksellistä, koska lämpöarvon heikentyessä energiaa tuhlaavia komponentteja ei käytetä. Tällöin energiankulutus riippuu suoraan säätökattilan tehon muutosnopeudesta, jonka maksimointi ei ole suotavaa suurista kattilaan kohdistuvista rasituksista johtuen.



Kuva 37: Höyryakun käyttö eri menetelmissä lämpöarvon pienentyessä.

6.3.3 Yhteenveto lämpöarvon heikentymisestä

Tehtyjen simulointien mukaan hallintamenetelmien väliset erot ovat kaikista pienimmät lämpöarvon heikentymisen tapauksessa. Tällöin tase-konseptin ohjaukset perustuvat KP-paineeseen ja tarpeen tullen myös MP-paineeseen taselaskennan sijaan. Taseratkaisussa MP-paine saadaan pysymään häiriöstä huolimatta lähes muuttumattomana. Myös painerajoihin perustuvissa ratkaisuissa MP-paine pysyy tasaisena häiriön ilmenemisessä tapahtuvaa pientä pudotusta lukuun ottamatta. Taseratkaisussa kattilan tehon ohjaus on muita menetelmiä rauhallisempi, jolloin kattila ei turhaan reagoi voimakkaasti lyhytaikaiseen häiriöön. Haittana tässä on pidempiaikainen tasauskomponenttien käyttötarve mikäli polttoaineen laadunmuutos on pysyvä. Toisaalta tase-konseptia on tarkoitus käyttää kehittyneiden kattilasäätöjen eli lähinnä Balance+ -kattilasäätöjen kanssa, jolloin kattilasäädöt korjaavat muuttuneen lämpöarvon vaikutukset höyryntuotannossa.

6.4 Tase-konseptin toimivuus ja käytännön huomioita

Taseratkaisu toimii verratuista menetelmistä selkeästi parhaiten prosessihöyryn kulutuksen häiriöissä. Taselaskenta antaa heti häiriön ilmaannuttua lasketun ohjauksen tasauskomponenteille. Laskettua tasausta pienennetään tai kasvatetaan mikäli KP-paine karkaa kauas asetusarvostaan. Tämän lisäksi tasauskomponenttien toimintaa ohjataan erilaisilla rajoituksilla toimintapisteen mukaan siten, etteivät ne pääse tekemään ei-toivottuja ohjauksia. Simulointien mukaan taseratkaisulla MP-paine saadaan pysymään kaikissa tapauksissa kutakuinkin vakiona, joten höyryä käyttävään prosessiin ei kohdistu ylimääräisiä häiriöitä. Myös KP-paineen muutokset ovat muita ratkaisuja selkeästi pienemmät. Tämä pienentää tarvetta kattilan tulitehon ohjausmuutoksille ja samalla kattilaan kohdistuvat rasitukset pienenevät.

Taseratkaisussa reagoidaan kattilasta peräisin oleviin häiriöihin eri tavalla kuin höyryn kulutushäiriöihin, koska kattilahäiriöt eivät vaikuta prosessihöyryn kulutukseen. Tämän vuoksi menetelmään on kehitetty tasausratkaisut siten, että kummankin tyyppiset häiriöt pystytään tehokkaasti kompensoimaan. Kuten luvun 6.3 tuloksista nähtiin, synnyttää painerajoihin perustuva tasauskomponenttien käyttö väkisinkin hieman värähtelyä höyryverkkoon. Tämän vuoksi tasausohjauksia on pehmitetty siten, että tasaustarve poistuu rauhallisesti, jolloin paineiden värähtelyt minimoituvat. Häiriön tullessa kattilalta ei taseratkaisusta saada juurikaan etuja verkon paineiden hallintaan muihin ratkaisuihin verrattuna, mutta pienemmät kattilan tehonmuutostarpeet pienentävät kattilaan kohdistuvia rasituksia tässäkin tapauksessa. Taseratkaisussa verkon paineisiin perustuvan myötäkytkennän toimivuus (luku 5.4) riippuu voimakkaasti häiriön suuruudesta. Myötäkytkennän viritys onkin kompromissi suurten ja pienten häiriöiden väliltä.

Taselaskennan käytössä on huomioitava mittausten mahdolliset vikaantumiset. Tällöin on pidettävä huoli siitä, että säätö toimii edelleen myös mittauksen ja laskennan vikaannuttua. Tässä työssä asiaa ei ole huomioitu, mutta oikeissa prosesseissa tämä on erittäin tärkeä asia. Monissa tapauksissa taselaskenta voidaan toteuttaa mittauksen vikaantuessa epäsuorasti muita suureita käyttäen. Esimerkiksi syöttövesisäiliöön tulevaa lauhdevirtausta voidaan arvioida muiden virtausmittausten avulla, jolloin taseratkaisun käyttöä voidaan jatkaa viallisesta mittauksesta huolimatta.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä vertailtiin kolmea höyryverkon hallintamenetelmää. Ensimmäinen näistä mukailee teollisuudessa usein esiintyvää menetelmää, jossa höyryverkon tasauskomponentteja käytetään rinnakkaisiin painerajoihin perustuen. Yleensä syöttövesisäiliö ei ole mukana kuorman tasauksessa, joten sitä ei ole tässä ratkaisussa mukana. Työn pääasiallinen tarkoitus oli kehittää tasepohjaista höyryverkon hallintamenetelmää, jossa sovelletaan ÅF Consult Oy:n kehittämää Balance+ -säätokonseptia sekä tutkia menetelmän tehokkuutta höyryverkon hallinnassa. Tässä ratkaisussa käytetään höyryverkon hallintakomponentteja mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti, joten myös syöttövesisäiliö osallistuu kuormantasaukseen. Jotta syöttövesisäiliön käytön ja tasekonseptin hyödyt saatiin paremmin eroteltua, toteutettiin vielä kolmas höyryverkon hallintaratkaisu. Tämä ratkaisu on muuten samanlainen ensimmäisen painerajoihin perustuvan ratkaisun kanssa, mutta siihen on lisätty mukaan painerajoihin perustuva syöttövesisäiliön ohjaus.

Menetelmien toimivuutta tutkittiin Simulink –simulaattorilla, joka luotiin osana tätä diplomityötä. Tehtyjen simulointien perusteella syöttövesisäiliön käyttö höyrykuorman tasauksessa on hyvin kannattavaa. Sen käyttö lisää kuormantasauskapasiteettia ja täten höyryverkko sietää suurempia häiriöitä. Toinen merkittävä etu on pienentynyt ulospuhalluksen, apulauhduksen ja höyryakun käyttötarve. Kaikkien edellä lueteltujen komponenttien käyttö lisää kustannuksia, joten syöttövesisäiliön tasauskäytöllä saadaan suoraan pienennettyä kustannuksia hukatun sähkö- ja höyrytehon muodossa. Lisäksi syöttövesisäiliön lisääminen olemassa olevaan höyryverkon hallintaan on lisäksi melko yksinkertainen toimenpide.

Höyryverkon toiminta paranee merkittävästi korvaamalla perinteinen painerajoihin perustuva höyryverkon hallintajärjestelmä tasekonseptilla. Vaikka lisäämällä syöttövesisäiliö mukaan perinteiseen ratkaisuun saadaan tasauskapasiteettia kasvatettua, ei sillä saavuteta maksimaalista kuormantasauskapasiteettia, koska värähtelyn estämiseksi syöttövesisäiliön säädöt on viritettävä rauhallisiksi. Painerajoihin perustuvilla ratkaisuilta ei saavuteta taseratkaisun kaltaisia tasaisia ja pehmeitä ohjauksia. Tasaiset ohjausliikkeet ovat hyvin tärkeitä komponenttien eliniän ja prosessiin kohdistuvien häiriöiden minimoinnin kannalta. Varsinkin kattilaan kohdistuvien rasitusten pieneminen tasekonseptin ansiosta on suuri etu painerajoihin perustuviin ratkaisuihin verrattuna, sillä rasitukset ovat suoraan yhteydessä kattilan elinikään ja huoltotarpeeseen. Painerajoihin perustuvien PI-säädinten virityksessä päädytään aina kompromissiin. Nopea säädin reagoi herkästi pieniinkin muutoksiin, kuluttaa toimilaitteita ja ohjaus aiheuttaa häiriöitä muualle prosessiin. Rauhallinen säädin ei puolestaan reagoi tarpeeksi nopeasti häiriöihin

ja tällöin höyryverkon paineet saattavat karata liian kauas asetusarvoistaan. Taselaskennasta saatavat taseauskomponenttien ohjaukset ovat tasaisia, mutta riittävän voimakkaita eikä painerajoihin perustuvien PI-säädinten virityksen kaltaisiin kompromisseihin jouduta tyytymään.

Todelliset teollisuuden höyryverkot eivät koskaan ole samanlaisia. Tämän vuoksi höyryverkon säätö on toteutettava aina tapauskohtaisesti, mutta tämän työn tasekonseptin periaatteita voidaan aina soveltaa teollisen mittakaavan sovellutuksissa. Tässä työssä tutkittu höyryverkko sisältää kaikki keskeiset pääkomponentit ja sen toimintaa on tutkittu keskeisimmillä päähäiriöillä. Simulaattoria voidaan jatkossa käyttää erilaisten höyryverkkojen simuloinnissa sekä virityksessä kustomoimalla verkon rakennetta ja siihen kohdistuvia häiriöitä projektikohtaisesti. Tämän lisäksi jatkossa simulaattorin käyttöä voidaan laajentaa höyryverkoista myös kattilan pääsäätöjen laajempaan simulointiin ja käyttää osana myös niiden testausta.

LÄHTEET

- [1] Jalkanen, J., The world's northernmost paper mill relies on model predictive controls Automation 1, 2006, pp 20-21, [Viitattu 12.6.2014], Saatavissa: [http://www.metso.com/Automation/magazinebank.nsf/Resource/aut_1_06_pages20_21/\\$File/aut_1_06_pages20_21.pdf](http://www.metso.com/Automation/magazinebank.nsf/Resource/aut_1_06_pages20_21/$File/aut_1_06_pages20_21.pdf).
- [2] Majanne, Y., Mallipohjainen ennustava säätö [Verkkodokumentti], AEL, 2006, 25 s. [Viitattu 12.5.2014]. Saatavissa: <http://www.ac.tut.fi/aci/courses/ACI-21030/Mallipohjainen%20ennustava%20s%C3%A4%C3%A4t%C3%B6.pdf>.
- [3] Majanne, Y., Model predictive pressure control of steam networks, Elsevier Science Ltd Control Engineering Practise, 2005, vol.13, pp. 1499-1505.
- [4] Maasalo, M., Steam Balance EPC package turn-key steam accumulator installation [Verkkodokumentti], Pöyry, 11 s. [Viitattu 3.5.2014], Saatavissa: <http://www.poyry.at/sites/www.poyry.at/files/25.pdf>.
- [5] Balance+ concept [Asiakasesite], Saatavissa: info.fi@afconsult.com
- [6] Joronen, T., Kovács, J. & Majanne, Y. Voimalaitosautomaatio, 2. painos, Suomen Automaatioseura ry, Helsinki 2007, 276 s.
- [7] O'Kelly, P., Computer Simulation of Thermal Plant Operations, Springer, Sydney 2013, p. 511.
- [8] Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen H., Höyrykattilatekniikka, 6. painos, Oy Edita Ab, Helsinki 2004, 379 s.
- [9] Raiko, R. & Saarenpää, I. KEB-43100 Höyrytekniikka – luentomoniste, Tampere 2014, Tampereen teknillinen yliopisto – Kemian ja biotekniikan laitos, 254 s.
- [10] Finnish expert report on best available technique in large combustion plants [Verkkodokumentti], Suomen ympäristökeskus, Helsinki 2001, 143 s. [Viitattu 3.6.2014]. Saatavissa: www.ymparisto.fi/download/noname/%7BE73774D6-0ACB-4A13-A9AC-DD3EA9052578%7D/57223.
- [11] Glyn, J., Advanced Modern Engineering Mathematics, fourth edition, Pearson, p. 1036.
- [12] Åström, K.J. & Bell, R.D., Drum-boiler dynamics, Elsevier Science Ltd Automatica, 2000, vol.36, pp. 363-378.

- [13] Raiko, R., ENER-8240 Voimalaitostekniikka – luentomoniste. Tampere 2011, Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 248 s.
- [14] Chaibakhsh, A., Ghaffari, A., Steam turbine model, Elsevier Simulation Modeling Practice and Theory, 2008, vol.16, pp. 1145-1162.
- [15] Levine, W.S., The Control Handbook, IEEE Press, 1995, p. 1507.
- [16] Jussila, T., ASE-1250 Järjestelmien ohjaus – luentomoniste, Tampere 2010, Tampereen teknillinen yliopisto – Systemitekniikan laitos, 351 s.
- [17] Åström, K.J. & Murray, R.M., Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers, Princeton University Press, 2008, 394 p., [Viitattu 19.09.2014], Saatavissa: <http://press.princeton.edu/titles/8701.html>.
- [18] Matlab R2014a Documentation, [Viitattu 2.8.2014], Saatavissa: <http://www.mathworks.se/help/>.
- [19] Eksin, I., Guzelkaya, M., Markaroglu H., & Yesil, E., Tracking time adjustment in back calculation anti-windup scheme, Proceedings 20th European Conference on Modelling and Simulation, ECMS, 2006, p. 6.
- [20] Kocaarslan, I., & Cam, E., An adaptive control application in a large thermal combined power plant, Elsevier Science Ltd Energy Conversion and Management, 2007, vol.48, pp. 174-183.
- [21] Landau, I.D., Lozano, R., M'Saad, M. & Karimi, A., Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications, 2. painos, Springer-Verlag, Lontoo, 2011, p. 425.
- [22] ÅF Consult säätökaaviot, rajoitettu saatavuus.
- [23] Dormand, J.R. & Prince, P.J., A family of embedded Runge-Kutta formulae, Elsevier Journal of Computational and Applied Mathematics, 1980, vol.6, no 1, pp. 19-26, Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0771050X80900133>.
- [24] The International Association for the Properties of Water and Steam. Korjattu versio julkaisusta IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, Lucerne, 2007, 49 s. [Viitattu 10.7.2014], Saatavissa: <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf>.

- [25] Holmgren, M., X-Steam For Matlab [m-file], [Viitattu 12.5.2014], Saatavissa: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam--thermodynamic-properties-of-water-and-steam>.
- [26] MATLAB Programming Fundamentals R2014a [Verkkodokumentti], Math-Works, 2014, [Viitattu 20.7.2014], Saatavissa: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/matlab_prog.pdf.
- [27] Stenback, D., Modeling and Model Predictive Control of a Multilevel Steam Network, Chalmers University of Technology, 2013, p. 37, [Viitattu 14.8.2014], Saatavissa: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/184263/184263.pdf>.
- [28] Viitanen, Jari, Säätoasiantuntija. ÅF-Consult Oy. Keskustelut Tampereella 1.5.2014-1.10.2014